

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Application No.: NEW Group Art Unit: Unknown  
Filing Date: March 3, 2004 Examiner: Unknown  
Applicants: Dong-Woo CHO et al.  
Title: OFF-LINE FEED RATE SCHEDULING FOR REDUCTION OF  
MACHINING TIME AND ENHANCEMENT OF MACHINING  
ACCURACY IN CNC MACHINING

**PRIORITY LETTER**

March 3, 2004

**BOX NEW PATENT APPLICATION**

Commissioner for Patents  
P.O. Box 1450  
Alexandria, VA 22313-1450

Dear Sirs:

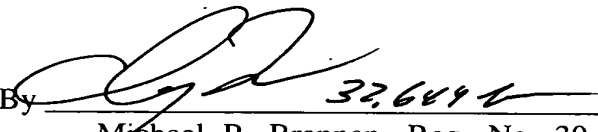
Pursuant to the provisions of 35 U.S.C. 119, enclosed is/are a certified copy of the following priority document(s).

<b><u>Application No.</u></b>	<b><u>Date Filed</u></b>	<b><u>Country</u></b>
2003-0082695	November 20, 2003	Republic of Korea

In support of Applicant's priority claim, please enter this document into the file.

Respectfully submitted,

HARNESS, DICKEY, & PIERCE, P.L.C.

By  32,689-1  
Michael P. Brennan, Reg. No. 30,612

P.O. Box 8910  
Reston, Virginia 20195  
(703) 668-8000

TLC:ewd  
Enclosure



별첨 사본은 아래 출원의 원본과 동일함을 증명함.

This is to certify that the following application annexed hereto  
is a true copy from the records of the Korean Intellectual  
Property Office.

출원번호 : 10-2003-0082695  
Application Number

출원년월일 : 2003년 11월 20일  
Date of Application NOV 20, 2003

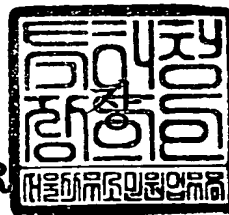
출원인 : 학교법인 포항공과대학교  
Applicant(s) POSTECH FOUNDATION



2003 년 12 월 17 일

특 허 청

COMMISSIONER



## 【서지사항】

【서류명】	특허출원서
【권리구분】	특허
【수신처】	특허청장
【제출일자】	2003.11.20
【발명의 명칭】	C N C 가공에서 생산시간 단축과 가공 정밀도 향상을 위한 이송속도 스케줄링 방법
【발명의 영문명칭】	OFF-LINE FEED RATE SCHEDULING FOR REDUCTION OF MACHINING TIME AND ENHANCEMENT OF MACHINING ACCURACY IN CNC MACHINING
【출원인】	
【명칭】	학교법인 포항공과대학교
【출원인코드】	2-1999-900096-8
【대리인】	
【명칭】	유미특허법인
【대리인코드】	9-2001-100003-6
【지정된변리사】	오원석
【포괄위임등록번호】	2001-042214-3
【발명자】	
【성명의 국문표기】	조동우
【성명의 영문표기】	CHO, DONG WOO
【주민등록번호】	580223-1047722
【우편번호】	790-784
【주소】	경상북도 포항시 남구 효자동 산31번지 포항공과대학교 기계공학과
【국적】	KR
【발명자】	
【성명의 국문표기】	고정훈
【성명의 영문표기】	KO, JEONG HOON
【주민등록번호】	740419-1120124
【우편번호】	790-784
【주소】	경상북도 포항시 남구 효자동 산31번지 포항공과대학교 공학 5동 304 호
【국적】	KR

## 【발명자】

【성명의 국문표기】

이한울

【성명의 영문표기】

LEE, HAN UL

【주민등록번호】

771220-1330911

【우편번호】

790-784

【주소】

경상북도 포항시 남구 효자동 산31번지 포항공과대학교 공학 5  
동 304 호

【국적】

KR

## 【심사청구】

청구

## 【취지】

특허법 제42조의 규정에 의한 출원, 특허법 제60조의 규정에 의  
한 출원심사 를 청구합니다. 대리인  
유미특허법인 (인)

## 【수수료】

【기본출원료】

20 면 29,000 원

【가산출원료】

46 면 46,000 원

【우선권주장료】

0 건 0 원

【심사청구료】

15 항 589,000 원

【합계】

664,000 원

【감면사유】

학교

【감면후 수수료】

332,000 원

## 【첨부서류】

1. 요약서·명세서(도면)\_1통

**【요약서】****【요약】**

본 발명은 CNC 가공기술에 관한 것으로, 보다 상세하게는 CNC 가공에서 생산시간 단축과 가공 정밀도 향상을 위한 이송속도 스케줄링 방법에 관한 것이다.

본 발명에 따른 CNC 가공공정의 이송속도 스케줄링 방법은, 구속변수(constraint variable)를 선택하고 이 구속변수에 대한 기준값을 입력하는 단계와; ME Z-map 모델링을 통하여 최대 구속변수값(CVV)이 발생하는 절삭해석정보(cutting configuration)를 추정하는 단계와; 상기 추정된 절삭해석정보를 전달받아 구속변수 모델링을 통하여 최대 구속변수값이 발생하는 특정 회전각( $\phi_s$ )을 추정하는 단계와; 상기 추정된 특정 회전각( $\phi_s$ )에서 상기 구속변수의 기준값을 만족하도록 하는 이송속도를 산출하는 단계; 및 상기 산출된 이송속도를 NC 코드에 부여하는 단계를 포함한다.

구속변수로는 가공조건에 따라 절삭력(cutting force) 또는 가공 표면 오차(machined surface error)가 선택될 수 있다.

**【대표도】**

도 1

**【색인어】**

CNC, 이송속도, 구속변수, 절삭력, 가공 표면 오차

## 【명세서】

## 【발명의 명칭】

CNC 가공에서 생산시간 단축과 가공 정밀도 향상을 위한 이송속도 스케줄링 방법  
{OFF-LINE FEED RATE SCHEDULING FOR REDUCTION OF MACHINING TIME AND ENHANCEMENT OF  
MACHINING ACCURACY IN CNC MACHINING}

## 【도면의 간단한 설명】

도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 이송속도 스케줄링 시스템의 구조를 도시한 구성도이다.

도 2는 기본적인 평엔드 밀링 공정의 형상과 좌표계를 나타낸 개략도이다.

도 3은 평엔드 밀링 공구의 단면에서의 공구 회전각과 절삭날 위치각을 나타내기 위하여 도시한 개념도이다.

도 4는 절삭력 계수를 산출하는 방법을 설명하기 위하여 도시한 개념도이다.

도 5는 절삭력 계수 산출방법을 나타낸 순서도이다.

도 6은 미변형 칩두께를 계산하는 방법을 설명하기 위하여 도시한 개념도이다.

도 7a 및 7b는 각각 볼엔드 밀링 공구의 형상과 좌표를 나타낸 개념도이다.

도 8은 공구 형상에 따른 치수 효과를 설명하기 위하여 도시한 개념도이다.

도 9는 볼엔드 밀링 공구에서의 국부적 헬릭스 각( $\theta_{hl}$ )과 국부적 유효 헬릭스 각( $\theta_{hlc}$ )을 나타낸 개념도이다.

도 10a는 볼엔드 밀링의 3축 가공에서 이송속도의 요소를 나타내기 위하여 도시한 개념도이고, 도 10b는 볼엔드 밀링의 미변형 칩두께를 계산하기 위하여 도시한 개념도이다.

도 11a는 가공 표면오차가 발생하는 제1 경우를 도시한 개념도이고, 도 11b는 가공 표면 오차가 발생하는 제2 경우를 도시한 개념도이며, 도 11c는 가공 표면오차가 발생하는 제3 경우를 도시한 개념도이다.

도 12는 가공 표면오차를 정의하기 위하여 도시한 개념도이다.

도 13은 공구의 런아웃을 정의하기 위하여 도시한 개념도이다.

도 14는 공구의 휨을 정의하기 위하여 도시한 개념도이다.

도 15a 및 15b는 커스프(Cusp) 모양을 도시한 모식도이고, 도 15c는 커스프의 높이를 정의하기 위하여 도시한 개념도이다.

도 16은 ME Z-map의 기본개념을 설명하기 위하여 도시한 개념도이다.

도 17a는 모서리점을 포함하는 영역을 나타낸 개념도이고, 도 17b는 모서리점을 재배치하여 나타낸 개념도이다.

도 18은 격자점의 움직임 가능거리를 설명하기 위하여 도시한 개념도이다.

도 19는 절입각과 배출각이 두 개 이상 존재하는 경우를 표시한 개념도이다.

도 20은 디스크 요소의 그룹화를 설명하기 위하여 도시한 개념도이다.

도 21은 절삭 해석변수 계산 알고리즘을 나타낸 순서도이다.

도 22a 및 22b는 공구의 항절력을 고려한 기준 절삭력을 결정하기 위해 도시한 개념도이다.

도 23은 주어진 NC 코드 구간에서 구속변수를 기준값에 만족하도록 이송속도를 산출하기 위한 알고리즘을 나타낸 순서도이다.

도 24는 공작기계의 가감속 특성을 나타낸 그래프이다.

## 【발명의 상세한 설명】

## 【발명의 목적】

## 【발명이 속하는 기술분야 및 그 분야의 종래기술】

- <25> 본 발명은 CNC 가공기술에 관한 것으로, 보다 상세하게는 CNC 가공에서 생산시간 단축과 가공 정밀도 향상을 위한 이송속도 스케줄링 방법에 관한 것이다.
- <26> 다품종 소량 생산의 경향에 따라 제품의 설계 및 생산의 주기가 빨라지고 국가별 산업 경쟁력이 국가의 생존과 결부되는 현대 산업 사회에서 금형가공 기술에 대한 연구는 필수적이다. 현재 현장 작업자들은 CAM 소프트웨어로 공구 경로를 생성한 뒤에도 경험적인 가공 조건에 의존하여 가공을 수행하고 있다. 현장의 작업자들은 주로 안정적인 가공 조건에 의존하고 있어 생산성이 저하된다. 그리고 코너부와 같은 공구 경로들이 만나는 과도 절삭(transient cut) 영역에서는 작업자들이 임의로 이송 속도를 조절하기 때문에 가공 표면 오차가 많이 발생한다. 또한 NC 가공 후 생성된 가공 표면 오차를 제거하기 위해 수작업에 많이 의존한다. 이러한 현장의 문제는 체계적인 가공 조건 선정을 통하여 해결할 수 있다. 이송 속도 스케줄링 시스템은 공작 기계 사용자에게 가공성, 가공 안정성, 가공 표면 오차를 고려한 최적의 가공 조건을 제공해 주기 때문에 제조원가의 절감 및 다품종, 소량 체제에 대한 적응성 등 여러 가지 측면에서 유용한 도구가 될 수 있다.
- <27> CNC 가공에서 생산성 향상과 관련이 있는 이송 속도의 최적화에 대한 필요성이 점점 부각되고 있지만 아직 다양한 제품을 생산하는데 사용될 수 있을 정도의 일반적인 기술로 정립되어 있지 못하다. 그 이유는 절삭 공정에 대해 명료하게 분석되어 있지 않아서 다양한 절삭 조건에서의 가공 결과를 예측하기가 힘들기 때문이다. CNC 가공에서 최적의 절삭 조건을 산출



하기 위해서는 많은 시행착오를 거쳐야 하며 그 지식은 자료화하기가 어려워 새로운 작업자의 경우 가공에 숙련되는 시간이 많이 소모된다.

<28> 최근 국내외 CAM 소프트웨어 회사에서는 시장 경쟁력을 향상시키기 위해 이송 속도 최적화 방법을 도입하고 있다. 하지만 현재 대부분의 CAM 소프트웨어에서 사용하는 이송속도 최적화 방법은 피삭재와 공구간의 기하학적 관계를 고려하여 소재 제거량(MRR: material removal rate)을 일정하게 유지하는 방식이다. 그러나 MRR을 이용하는 방식은 절삭력의 정확한 조절 및 절삭력 계수의 데이터 베이스화가 불가능하다. 같은 MRR에서도 스피들 속도가 바뀔에 따라 절삭력의 크기는 상당히 다르게 나타날 수 있기 때문에 이러한 방식은 곧 경쟁력을 상실할 것으로 예측된다. 따라서 절삭력 모델을 기반으로 한 이송 속도 스케줄링의 방식이 개발되어야 하며 절삭력 모델이 정확하다면 이송 속도 스케줄링에도 효과적으로 적용될 수 있다.

#### 【발명이 이루고자 하는 기술적 과제】

<29> 본 발명은 상기한 바와 같은 문제점을 해결하기 위하여 창안된 것으로, 그 목적은 절삭력 모델 및 표면 오차 모델을 기반으로 CNC 가공에서 이송 속도를 최적화할 수 있는 이송 속도 스케줄링 모델(off-line feed rate scheduling)을 개발함으로써 CNC 가공 시 가공 정밀도와 생산성을 향상시킬 수 있는 이송속도 스케줄링 방법을 제공하는 것이다.

#### 【발명의 구성 및 작용】

<30> 상기의 목적을 달성하기 위하여 본 발명에 따른 CNC 가공공정의 이송속도 스케줄링 방법은, 구속변수(constraint variable)를 선택하고 이 구속변수에 대한 기준값을 입력하는 단계와; ME Z-map 모델링을 통하여 최대 구속변수값(CVV)이 발생하는 절삭해석정보(cutting configuration)를 추정하는 단계와; 상기 추정된 절삭해석정보를 전달받아 구속변수 모델링을

통하여 최대 구속변수값이 발생하는 특정 회전각( $\phi_s$ )을 추정하는 단계와; 상기 추정된 특정 회전각( $\phi_s$ )에서 상기 구속변수의 기준값을 만족하도록 하는 이송속도를 산출하는 단계; 및 상기 산출된 이송속도를 NC 코드에 부여하는 단계를 포함한다.

<31> 구속변수로는 가공조건에 따라 절삭력(cutting force) 또는 가공 표면 오차(machined surface error)가 선택될 수 있다.

<32> 이 때, 상기 이송속도를 산출하는 단계는, 임의의 이송속도  $f_1$ 과  $f_2$  ( $f_1 < f_2$ )를 입력하는 제1 단계; 상기 특정 회전각에서 상기 이송속도  $f_1$ 과  $f_2$ 에 각각 대응하는 최대 구속변수값  $CVV_1$  과  $CVV_2$ 를 산출하는 제2 단계; 하기 식을 이용하여 상기 구속변수값의 기준값  $RV$ 에 해당하는 이송속도  $f_{next}$ 를 근사(近似)하는 제3 단계;

$$<33> \quad f_{next} = f_1 + \frac{(RV - CVV_1)(f_2 - f_1)}{CVV_2 - CVV_1}$$

<34> 상기 이송속도  $f_{next}$  일 경우의 구속변수값  $CVV_{next}$ 를 산출하는 제4 단계; 및 하기 식을 이용하여 상기 구속변수값  $CVV_{next}$ 가 기준값  $RV$ 와 비교할 때 오차한계 이내인지 판단하여, 오차한계 이내일 경우 상기 이송속도  $f_{next}$ 를 NC 코드에 부여하고, 오차한계 이내가 아닐 경우 기준값  $RV$ 가 구속변수값  $CVV_{next}$  보다 크면 이송속도  $f_2$ 를  $f_{next}$ 로 대체하여 제1 단계로 분기하고, 기준값  $RV$ 가 구속변수값  $CVV_{next}$  보다 작으면 이송속도  $f_1$ 를  $f_{next}$ 로 대체하여 제1 단계로 분기하는 제5 단계

$$<35> \quad \frac{CVV_{next} - RV}{RV} < \text{오차한계}$$

<36> 를 포함한다.

- <37> 또한 상기 ME Z-map 모델링을 통하여 절삭해석정보를 추정하는 단계는, 공구와 접촉하는 격자점을 순서대로 검색하는 단계와; 선택된 격자점이 모서리 점(공구 이동면에서의 모서리 영역에 포함되는 점)인지 여부를 판단하는 단계와; 모서리 점일 경우 상기 격자점을 이동하고 이 격자점의 높이 값을 변경하는 단계와; 이동하는 모서리 점의 이동 방향의 각도를 저장하는 단계; 및 저장된 이동 방향의 각도를 이용하여 절삭해석정보를 계산하는 단계를 포함한다.
- <38> 상기 모서리 점은, 공구 중심에서 격자점까지의 거리와 공구 반지름의 차이가 현재 격자점의 움직임 가능 거리보다 작을 경우의 격자점으로 정의되며, 상기 ME Z-map 모델링을 통하여 절입각(Entry angle), 배출각(Exit angle) 또는 절삭 깊이(Axial depth of cut) 중 적어도 하나 이상의 절삭해석정보가 추정될 수 있다.
- <39> 이하, 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 실시예를 상세하게 설명하면 다음과 같다.
- <40> 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 이송속도 스케줄링 시스템의 구조를 도시한 구성도이다.
- <41> 본 발명의 일 실시예에 따른 이송속도 스케줄링 시스템은 절삭력 모델, 가공 표면오차 모델, ME(Moving Edge node) Z-map 모델, 최적 이송속도 산출 알고리즘의 네가지 구성요소로 이루어진다.
- <42> 도 1에서 보는 바와 같이, NC 코드, 가공 정보와 이송 속도 스케줄링을 위한 변수들 즉 구속 변수(절삭력 또는 가공 표면 오차)를 선택한 뒤 기준 값(reference value), 시뮬레이션 간격, 가감속 시간을 입력했을 때 이송 속도 스케줄링이 수행된다. 절삭력을 구속 변수로 설정하였을 경우에는 별도로 입력할 필요 없이 기준값이 자동으로 계산되고, 가공 표면 오차를 구속 변수로 설정하였을 경우에는 사용자가 원하는 가공 허용 오차를 기준값으로 입력한다.

- <43> 그리고 ME Z-map 모델로부터 공구 진행 방향, 공구의 입출력각(entry/exit angle), 절삭 깊이 등과 같은 절삭해석정보(Cutting configuration)를 계산하여 절삭력 모델과 가공 표면 오차 모델로 전달한다. 그리고 나면, 절삭력 모델과 가공 표면오차 모델로부터 절삭력, 공구 힘, 가공 표면 오차가 계산된다. 이 값이 사용자가 입력한 기준값을 만족하도록 이송속도 스케줄링 알고리즘을 이용하여 원하는 이송속도를 찾고 원래의 NC 코드에 최적화된 이송속도를 부여한다.
- <44> 이송속도 스케줄링을 수행하는 방식은 구속변수(constraint variable, CV)에 따라 달라진다. 이러한 구속변수로 본 실시예에서 절삭력과 가공 표면오차를 선택할 수 있다. 즉, 사용자가 절삭력 또는 가공 표면오차를 조절하고자 할 경우, 각 구속변수의 선택에 따른 이송속도 스케줄링 방법이 활용될 수 있다. 황삭, 중삭, 정삭에 따라 사용자 임의로 절삭력 또는 가공 표면오차를 구속변수로 선택하여 사용할 수 있으며, 일반적으로 황삭과 중삭에서는 절삭력을 구속변수로 설정하고 정삭에서는 가공 표면오차를 구속변수로 설정하는 것이 바람직하다.
- <45> 이하에서는 먼저 절삭력과 가공 표면오차에 대한 각각의 모델을 계산하여 구하고, ME Z-map 모델을 통하여 절삭해석정보를 산출하는 방법을 제시하며, 이들 구속변수(절삭력 또는 가공 표면오차) 모델과 ME Z-map 모델을 이용하여 주어진 기준값에 따른 최적의 이송속도를 산출하는 방법을 설명한다.
- <46> 절삭력을 구속변수로 선택할 경우 이러한 절삭력을 예측하기 위한 절삭력 모델이 필요하며, 본 실시예에서는 평엔드 밀링과 볼엔드 밀링에 대한 절삭력 모델을 계산하였다.
- <47> [평엔드 밀링 절삭력 모델]

<48> 도 2는 기본적인 평엔드 밀링 공정의 형상과 좌표계를 나타낸 개략도이고, 도 3은 평엔드 밀링 공구의 단면에서의 공구 회전각과 절삭날 위치각을 나타내기 위하여 도시한 개념도이다.

<49> 평엔드 밀링 공구는 미소(微小) 디스크 요소로 분할하여 각각의 미소 디스크에서의 순간 절삭력을 계산하고 최종적으로 이를 더함으로서 임의의 공구 회전각에 대해서 절삭력을 예측할 수 있다.

<50> 도 3에서 공구회전을 고려하지 않은 초기 상태에서  $i$ -번째 날,  $k$ -번째 축방향 디스크 요소의 각위치는 수학식 1과 같다.

<51>

$$\alpha(i, k) = (i-1)\phi_c + (k\Delta a + \Delta a/2) \frac{\tan \theta_h}{R}$$

【수학식 1】

<52> 여기서,  $i$ 는 공구날의 인덱스(tooth index)를 나타내고,  $k$ 는  $z$ 축 디스크 요소의 인덱스이고,  $\Delta a$ 는  $z$ 축 디스크 요소의 높이를 나타내고,  $\theta_h$ 는 공구의 나선 각도를 나타내고,  $R$ 은 공구의 반경을 나타낸다.

<53> 수학식 1에서 공구회전을 고려할 경우 공구 끝날의 각위치는 수학식 2와 같이 나타낼 수 있다.

<54>

$$\phi(i, j, k) = \alpha(i, k) + \theta(j)$$

$$\theta(j) = -j\Delta\theta$$

【수학식 2】

<55> 여기서,  $j$ 는 공구 회전각의 인덱스이고,  $\theta(j)$ 는 공구 회전각을 나타내고,  $\Delta\theta$ 는 회전각의 증가분을 나타낸다.

<56> 공구상면상에서의 절삭력 성분을 수직력(normal pressure force -  $dF_n(\phi)$ )과 마찰력(frictional force -  $dF_f(\phi)$ )로 구분하면 수학적 식 3 및 수학적 식 4와 같다.

<57> **【수학적 식 3】** 
$$dF_n(\alpha, \theta) = K_n A(\theta) \vec{n}(\alpha) dA_c$$

<58> **【수학적 식 4】** 
$$dF_f(\alpha, \theta) = K_f K_n A(\theta) \vec{T}_c(\alpha) dA_c$$

<59> 여기서,

<60> 
$$dA_c = t_c(\phi) \cos \alpha_r \left( \frac{\Delta a}{\cos \theta_h} \right)$$

<61> 
$$A(\theta) = \begin{vmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} B_1 = \cos \alpha_r \left( \frac{\Delta a}{\cos \theta_h} \right)$$

<62> 이다. 그리고  $\alpha_r$ 은 레이크 각(rake angle)이고,  $t_c(\phi)$ 는 미변형 칩두께이며 공구의 휨과 런아웃을 고려하여 계산되는 것이다.

<63> 수직력과 마찰력을 이용하여 절삭력을 직교 좌표계로 나타내면 수학적 식 5와 같다.

<64> 
$$\begin{aligned} F_x(i, j, k) &= [C_1 K_n \cos(\phi - \alpha_r) + K_f K_n C_3 \cos \phi - K_f K_n C_4 \sin(\phi - \alpha_r)] t_c(\phi) B_1 \\ F_y(i, j, k) &= [C_1 K_n \sin(\phi - \alpha_r) + K_f K_n C_3 \sin \phi + K_f K_n C_4 \cos(\phi - \alpha_r)] t_c(\phi) B_1 \\ F_z(i, j, k) &= [-C_2 K_n + K_f K_n C_5] t_c(\phi) B_1 \end{aligned}$$

**【수학적 식 5】**

<65> 여기서  $C_1, C_2$ 는 일정한 값으로,

<66> 
$$C_1 = \frac{\cos \theta_h}{\sin \theta_{tk}}, \quad C_2 = \frac{\sin \theta_h}{\sin \theta_{tk}} \cdot \cos \alpha_r$$
 와 같이하여 계산될 수 있고,

<67>  $C_3, C_4, C_5$ 는 칩 배출각  $\theta_c$ 에 의해 결정되는 값으로,

&lt;68&gt;

$$C_3 = \sin \theta_h (\sin \theta_c - \cos \theta_c \cot \theta_{th})$$

$$C_4 = \frac{\cos \theta_c}{\sin \theta_{th}}$$

$$C_5 = \cos \theta_h (\sin \theta_c - \cos \theta_c \cot \theta_{th})$$

와 같이하여 계산될 수 있다.

&lt;69&gt;

여기서,  $\cos \theta_{th} = \sin \alpha_r \cdot \sin \theta_h$  이다.

&lt;70&gt;

따라서 공구의 회전각에 따른 각 방향 절삭력 성분은 수학적식 6과 같이 나타나며, 실험을 통하여 측정된  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 를 이용하여 공구 회전각에 따른  $K_n$ ,  $K_f$ ,  $\theta_c$ 를 구할 수 있다.

&lt;71&gt;

$$F_x(j) = \sum_k \sum_i F_x(i, j, k)$$

$$F_y(j) = \sum_k \sum_i F_y(i, j, k)$$

$$F_z(j) = \sum_k \sum_i F_z(i, j, k)$$

【수학적식 6】

&lt;72&gt;

한편, 도 4는 절삭력 계수를 산출하는 방법을 설명하기 위하여 도시한 개략도이고, 도 5는 절삭력 계수 산출방법을 나타낸 흐름도이다.

&lt;73&gt;

절삭력 계수는 도 4와 같은 방식으로 구해진 공구 디스크 요소의 절삭날에 의해 발생된 순간 절삭력을 이용하여 구할 수 있다. 평엔드 밀은 바닥날과 헬리컬 날(helical edge)로 구성되어 있으며 절삭력 모델은 헬리컬 날의 형상에 대해 구현되어 있으므로 헬리컬 날에 의해 발생된 절삭력을 이용하여 절삭력 계수를 구한다.

&lt;74&gt;

도 5를 참조하면, 절삭깊이가 큰 조건에서 측정된 절삭력에서 절삭깊이가 작은 조건에서 측정된 절삭력을 빼게 되면 단위 디스크 요소의 헬리컬 날에 의해 발생하는 절삭력을 얻어낼 수 있다. 즉, 먼저 절삭깊이  $d_{a2}$ 와 절삭깊이  $d_{a1}$  ( $d_{a2} > d_{a1}$ )에서 각각의 절삭력  $F_2$ ,  $F_1$ 을 측정한다. 다음으로 각각의 절삭력의 측정값과 예측값과의 동기화 과정을 거친 뒤  $F_2$ 에서  $F_1$ 을

빠게 되면 단위 디스크 요소의 헬리컬 날에 가해지는 절삭력  $F(i,j,k)$ 를 얻을 수 있다. 이 절삭력  $F(i,j,k)$ 를 이용하여 공구의 런아웃과 절삭력 계수를 수학적 7 내지 수학적 9에 나타낸 바와 같은 식으로 구할 수 있다. 개발된 절삭력 계수는 절삭 조건에 대해 독립적인 형태로 다음과 같이 나타난다. 비선형식으로 표현 된 이유는 미변형 칩 두께가 작아지는 부근에서 절삭력 계수가 변하는 치수효과(size effect)를 나타내기 위함이다.

&lt;75&gt;

$$\ln(K_n(i,j,k)) = A_1 - (A_1 - A_2)e^{-(A_3 t_c(i,j,k))^{A_4}}$$

【수학적 7】

&lt;76&gt;

$$K_f(i,j,k) = B_1 - (B_1 - B_2)e^{-(B_3 t_c(i,j,k))^{B_4}}$$

【수학적 8】

&lt;77&gt;

$$\theta_c(i,j,k) = C_1 - (C_1 - C_2)e^{-(C_3 t_c(i,j,k))^{C_4}}$$

【수학적 9】

&lt;78&gt;

도 6은 미변형 칩두께를 계산하는 방법을 설명하기 위하여 도시한 개념도이다.

&lt;79&gt;

미변형 칩두께 모델은 상기 수학적 5에서 절삭력을 계산하기 위해 필요하다.

&lt;80&gt;

공구의 기하학적 형상을 이용하여 미변형 칩두께를 모델링할 경우 수학적 10과 같다.

이 모델은 미변형 칩두께를 계산하는데 시간이 적게 걸리는 장점이 있으나 단순한 기하학적인 상태만을 반영하고 있어 정밀도는 떨어진다.

&lt;81&gt;

$$t_c(\phi) = f_t \sin \phi$$

【수학적 10】

&lt;82&gt;

본 실시예에서 미변형 칩두께(uncut chip thickness)는 실제 공구의 움직임을 따라가면서 계산된다. 즉 이전 날들이 가공물의 표면에 남기고 간 자취와 현재 공구의 위치의 상대적인 차이를 이용하여 미변형 칩두께를 구한다. 미변형 칩두께를 구하기 위하여 도 6에 나타난 바와 같이 먼저  $(x_{am}, y_{am})$ 을 알고 있어야 한다.  $(x_{tm}, y_{tm})$ 은 수학적 11으로부터 계산된다.



여기서  $(x_{am}, y_{am})$ 은 이전 날( $m=1 \sim n_f$ 에서의 날)이 현재 날의 각위치( $\phi$ )를 지났을 때의 공구 중심 위치이고,  $(x_{tm}, y_{tm})$ 은  $(x_{am}, y_{am})$ 에서의 이전 날의 위치를 가리킨다.

&lt;83&gt;

$$y_{tm} = (-1/\tan \phi) \cdot x_{tm}$$

【수학식 11】

$$(x_{tm} - x_{am})^2 + (y_{tm} - y_{am})^2 = R^2$$

&lt;84&gt;

상기 수학식 11으로부터 미변형 칩두께는 수학식 12와 같이 계산될 수 있다.

&lt;85&gt;

$$t_{cm}(i, j, k) = R - \sqrt{x_{tm}^2 + y_{tm}^2}$$

【수학식 12】

$$t_c = \text{Max}[0, \text{Min}(t_{cm}(i, j, k))]$$

&lt;86&gt;

이하에서는 볼엔드 밀링 공구를 적용할 경우 절삭력 모델과 절삭력 계수, 미변형 칩두께 모델을 제시한다.

&lt;87&gt;

[볼엔드 밀링 절삭력 모델]

&lt;88&gt;

도 7a 및 7b는 각각 볼엔드 밀링 공구의 형상과 좌표를 나타낸 개념도이다.

&lt;89&gt;

볼엔드 밀링 공구의 날들은 구의 끝단에서 만나게 된다. 볼엔드 밀링 공구의 실린더 형상 부분은 일정한 헬릭스각을 가지며, 볼엔드 밀링 공구의 볼 부분의 방정식은 다음 수학식 13 및 14과 같이 표현된다.

&lt;90&gt;

【수학식 13】

$$R(z)^2 + (z - R_0)^2 = R_0^2$$

&lt;91&gt;

【수학식 14】

$$R(z)^2 = x^2 + y^2$$

&lt;92&gt;

여기서,  $R_0$ 는 반구의 중심으로 하는 원에서의 볼의 반경이다.  $R(Z)$ 는 임의의  $z$ 에서의  $xy$ 평면에서의 반경을 가리킨다.

<93> 볼 부분에서의 국부적 헬릭스 각은 일반적으로 다음 수학식 15와 같이 정의된다.

<94>

$$\theta_{hl}(z) = \tan^{-1} \left( \frac{R(z) \cdot \tan \theta_h}{R_0} \right)$$

【수학식 15】

<95>

도 7a에서 미분적 절삭날의 상면상에서 공구 상면에 수직한 단위벡터( $\vec{n}$ )와 칩유동 벡터( $\vec{T}_c$ )를 정의함으로써 상면상에 작용하는 수직력과 마찰력을 유도할 수 있다. 불엔드 밀링의 방정식을 유도하기 위해 먼저 공구 회전각  $\theta=0$ , 국부적 헬릭스각이  $\theta_h=0$  일 때 단위벡터들을 먼저 유도한다. 헬리컬 날이 공구 상면각( $\alpha_r$ )을 가지는 단위 벡터들은 다음과 같이 정의될 수 있다.

<96>

즉, 공구 상면상에 수직한 단위 벡터  $\vec{n}$  은 다음 수학식 16와 같다.

<97>

$$\vec{n} = \cos \alpha_r \vec{i} - \sin \alpha_r \vec{j}$$

【수학식 16】

<98>

절삭날의 접선방향의 단위 벡터(the unit vector tangent to the cutting edge)는 다음 수학식 17과 같다.

<99>

$$\vec{\tau}(\alpha) = \frac{d\vec{r}}{\|d\vec{r}\|} = \frac{dy\vec{j} + dz\vec{k}}{\sqrt{dy^2 + dz^2}} = \tau_y \vec{j} + \tau_z \vec{k} = \frac{f_1}{f_2} \vec{j} + \frac{1}{f_2} \vec{k}$$

【수학식 17】

<100>

여기서,

<101>

$$f_1 = \frac{dy}{dz} = \frac{(z - R_0)}{\sqrt{R_0^2 - (z - R_0)^2}} \quad \text{이고,} \quad f_2 = \sqrt{f_1^2 + 1} \quad \text{이다.}$$

<102> 절삭날의 접선 방향에 수직이고, 공구 상면상에 있는 단위벡터  $\vec{b}$ 는 다음 수학식 18과 같다.

<103>

$$\vec{b} = \vec{\tau} \times \vec{n} = \frac{1}{f_2} \sin \alpha_r \vec{i} + \frac{1}{f_2} \cos \alpha_r \vec{j} - \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r \vec{k}$$

【수학식 18】

<104> 따라서, 칩 유동벡터는 다음 수학식 19와 같이 정의된다.

<105>

$$\begin{aligned} \vec{T}_c &= \cos \theta_c \vec{b}(\alpha) + \sin \theta_c \vec{\tau}(\alpha) \\ &= \cos \theta_c \left( \frac{1}{f_2} \sin \alpha_r \vec{i} + \frac{1}{f_2} \cos \alpha_r \vec{j} - \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r \vec{k} \right) + \sin \theta_c \left( \frac{f_1}{f_2} \vec{j} + \frac{1}{f_2} \vec{k} \right) \\ &= \cos \theta_c \sin \alpha_r \frac{1}{f_2} \vec{i} + \left( \cos \theta_c \frac{1}{f_2} \cos \alpha_r + \sin \theta_c \frac{f_1}{f_2} \right) \vec{j} + \left( -\cos \theta_c \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r + \sin \theta_c \frac{1}{f_2} \right) \vec{k} \end{aligned}$$

【수학식 19】

<106> 공구 상면상에서의 절삭력은 두 개의 수직 성분 즉 수직력과 마찰력으로 다음 수학식 20 및 21과 같이 정의된다.

<107>

$$dF_n(i, j, k) = K_n T(\phi, \theta_{hl}) \vec{n} dA_c$$

【수학식 20】

<108>

$$dF_f(i, j, k) = K_f K_n T(\phi, \theta_{hl}) \vec{T}_c dA_c$$

【수학식 21】

<109> 여기서, 공구 회전각  $\theta$ 와 헬릭스 각  $\theta_h$ 로 인한 좌표 변환행렬은 다음 수학식 21과 같이 정의된다.

<110>

$$\begin{aligned} T(\phi, \theta_h) &= \begin{bmatrix} \cos(-\theta + \alpha) & -\sin(-\theta + \alpha) & 0 \\ \sin(-\theta + \alpha) & \cos(-\theta + \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_h) & 0 & \sin(\theta_h) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_h) & 0 & \cos(\theta_h) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta_h & -\sin \phi & \cos \phi \sin \theta_h \\ \sin \phi \cos \theta_h & \cos \phi & \sin \phi \sin \theta_h \\ -\sin \theta_h & 0 & \cos \theta_h \end{bmatrix} \end{aligned}$$

【수학식 22】

<111> 공구 상면 상에서 수직력과 마찰력을 3축 방향 절삭력으로 변환하게 되면 다음 수학적식 23 내지 25와 같다.

<112>

$$\begin{aligned}
 F_x(i,j,k) &= [K_n(\cos \alpha_r \cos \phi \cos \theta_h + \sin \alpha_r \sin \phi) + K_n K_f [\cos \theta_c \sin \alpha_r \frac{1}{f_2} \cos \phi \cos \theta_h \\
 &\quad - (\cos \theta_c \frac{1}{f_2} \cos \alpha_r + \sin \theta_c \frac{f_1}{f_2}) \sin \phi + (-\cos \theta_c \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r + \sin \theta_c \frac{1}{f_2}) \cos \phi \sin \theta_h]] dA_c \\
 &= [K_n(\cos \alpha_r \cos \phi \cos \theta_h + \sin \alpha_r \sin \phi) \\
 &\quad + K_n K_f \cos \theta_c [\sin \alpha_r \frac{1}{f_2} \cos \phi \cos \theta_h - \frac{1}{f_2} \cos \alpha_r \sin \phi - \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r \cos \phi \sin \theta_h] \\
 &\quad + K_n K_f \sin \theta_c [-\frac{f_1}{f_2} \sin \phi + \frac{1}{f_2} \cos \phi \sin \theta_h]] dA_c
 \end{aligned}$$

【수학적식 23】

<113>

$$\begin{aligned}
 F_y(i,j,k) &= [K_n(\cos \alpha_r \sin \phi \cos \theta_h - \sin \alpha_r \cos \phi) + K_n K_f [\cos \theta_c \sin \alpha_r \frac{1}{f_2} \sin \phi \cos \theta_h \\
 &\quad + (\cos \theta_c \frac{1}{f_2} \cos \alpha_r + \sin \theta_c \frac{f_1}{f_2}) \cos \phi + (-\cos \theta_c \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r + \sin \theta_c \frac{1}{f_2}) \sin \phi \sin \theta_h]] dA_c \\
 &= [K_n(\cos \alpha_r \sin \phi \cos \theta_h - \sin \alpha_r \cos \phi) + \\
 &\quad + K_n K_f \cos \theta_c (\sin \alpha_r \frac{1}{f_2} \sin \phi \cos \theta_h + \frac{1}{f_2} \cos \alpha_r \cos \phi - \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r \sin \phi \sin \theta_h) \\
 &\quad + K_n K_f \sin \theta_c (\frac{f_1}{f_2} \cos \phi + \frac{1}{f_2} \sin \phi \sin \theta_h)] dA_c
 \end{aligned}$$

【수학적식 24】

<114>

$$\begin{aligned}
 F_z(i,j,k) &= [-K_n \sin \theta_h \cos \alpha_r + K_n K_f [-\cos \theta_c \sin \alpha_r \frac{1}{f_2} \sin \theta_h \\
 &\quad + (-\cos \theta_c \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r + \sin \theta_c \frac{1}{f_2}) \cos \theta_h]] dA_c \\
 &= [-K_n \sin \theta_h \cos \alpha_r + K_n K_f \cos \theta_c (-\sin \alpha_r \frac{1}{f_2} \sin \theta_h - \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r \cos \theta_h) \\
 &\quad + K_n K_f \sin \theta_c \frac{1}{f_2} \cos \theta_h]] dA_c
 \end{aligned}$$

【수학적식 25】

<115> 공구의 회전각에 따른 각 방향 절삭력 성분은 다음 수학적식 26과 같이 나타낼 수 있으며, 실험을 통하여 측정된 절삭력( $F_j$ )을 이용하여 공구 회전각에 따른 절삭 계수값,  $K_n$ ,  $K_f$ ,  $\theta_c$ 를 구할 수 있다.

&lt;116&gt;

【수학식 26】

$$F_j = \sum_k \sum_i F_{ijk}$$

&lt;117&gt;

다시 수학식 26을 행렬로 나타내면 수학식 27과 같다.

&lt;118&gt;

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{Bmatrix}$$

【수학식 27】

&lt;119&gt;

여기서,

&lt;120&gt;

$$K_1 = K_n$$

$$K_2 = \cos \theta_c K_n K_f$$

$$K_3 = \sin \theta_c K_n K_f$$

$$A_{11} = B_1 \sum_k \sum_i (\cos \alpha_r \cos \phi \cos \theta_h + \sin \alpha_r \sin \phi) \cdot t_c(\phi)$$

$$A_{12} = B_1 \sum_k \sum_i (\sin \alpha_r \frac{1}{f_2} \cos \phi \cos \theta_h - \frac{1}{f_2} \cos \alpha_r \sin \phi - \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r \cos \phi \sin \theta_h) \cdot t_c(\phi)$$

$$A_{13} = B_1 \sum_k \sum_i (-\frac{f_1}{f_2} \sin \phi + \frac{1}{f_2} \cos \phi \sin \theta_h) \cdot t_c(\phi)$$

$$A_{21} = B_1 \sum_k \sum_i (\cos \alpha_r \sin \phi \cos \theta_h - \sin \alpha_r \cos \phi) \cdot t_c(\phi)$$

$$A_{22} = B_1 \sum_k \sum_i (\sin \alpha_r \frac{1}{f_2} \sin \phi \cos \theta_h + \frac{1}{f_2} \cos \alpha_r \cos \phi - \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r \sin \phi \sin \theta_h) \cdot t_c(\phi)$$

$$A_{23} = B_1 \sum_k \sum_i (\frac{f_1}{f_2} \cos \phi + \frac{1}{f_2} \sin \phi \sin \theta_h) \cdot t_c(\phi)$$

$$A_{31} = B_1 \sum_k \sum_i (-\sin \theta_h \cos \alpha_r) \cdot t_c(\phi)$$

$$A_{32} = B_1 \sum_k \sum_i (-\sin \alpha_r \frac{1}{f_2} \sin \theta_h - \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r \cos \theta_h) \cdot t_c(\phi)$$

<121> 측정된 절삭력으로부터  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ 가 구해질 수 있고 절삭력 계수는 다음 수학적 식 28과 같이 계산될 수 있다.

<122>

$$\begin{aligned} K_n &= K_1 \\ \theta_c &= \tan^{-1}\left(\frac{K_3}{K_2}\right) \\ K_f &= \frac{K_2}{\cos\theta_c K_n} \end{aligned}$$

【수학적 식 28】

<123> 도 8은 공구 형상에 따른 치수 효과를 설명하기 위하여 도시한 개념도이다.

<124> 도 8에서 i번째 디스크의 날 길이 보다 0번째 디스크의 날 길이가 긴 것을 볼 수 있다.

이로 인해 0번째 디스크의 플랭크 면에서 작용하는 힘이 커지게 되며 같은 미변형 칩두께에서도 다른 디스크보다 절삭 저항이 커지게 된다. 이것은 치수 효과로 간주할 수 있으며 본 발명에서는 디스크의 날 길이를 이용하여 이 효과를 반영함으로써 축방향의 절삭력 계수 변화를 효과적으로 고려하였다.

<125> 볼 엔드 밀링에서도 도 8과 같은 방식으로 디스크 요소에 의해 발생하는 절삭력을 구한 뒤 절삭력 계수를 구한다. 절삭력 계수는 다음 수학적 식 29 내지 31과 같이 정의된다. 본 발명에서 제안된 절삭력 계수식은 절삭 조건에 독립적이어서 두 번의 보정 실험으로 절삭력 예측이 가능하다. 다음 수학적 식 29와 같이  $K_n$ 을 각 디스크의 날에 의해 발생하는 치수 효과를 고려하여, 각 디스크의 날 길이(ds)를 이용하여 재설정된 순간 미변형 칩두께( $t_{cr}$ )에 대하여 정의함으로써 볼엔드 밀의 치수 효과를 고려하였다.

<126>

$$\ln(K_n) = A_1 - (A_1 - A_2)e^{-(A_3 t_{cr})^{A_4}}$$

【수학적 식 29】

&lt;127&gt;

$$t_{cr}(i, j, k) = \frac{t_c(i, j, k) / \cos \theta_{hl}}{ds(k) / \Delta a}$$

여기서, 이다.

&lt;128&gt;

$K_f$ 와  $\theta_c$ 는 각 디스크의 날의 길이에 따른 영향을 받지 않으므로, 순간 미변형 칩두께( $t_{cr}$ )를 이용하여 정의되었다.

&lt;129&gt;

$$K_f = B_1 - (B_1 - B_2)e^{-(B_3 t_c)^{B_4}}$$

【수학식 30】

&lt;130&gt;

$$\theta_c - \theta_{hlc} = \frac{C_1 - C_2}{1 + (t_c / C_3)^{C_4}} + C_2$$

【수학식 31】

&lt;131&gt;

여기서  $\theta_{hlc}$ 는 칩유동에 영향을 주는 볼 부분의 국부적 유효 헬릭스 각이다. 국부적 헬릭스 각( $\theta_{hl}$ )과 국부적 유효 헬릭스 각( $\theta_{hlc}$ )는 도 9를 참조하여 확인할 수 있다.

&lt;132&gt;

도 10a는 볼엔드 밀링의 3축 가공에서 이송속도의 요소를 나타내기 위하여 도시한 개념도이고, 도 10b는 볼엔드 밀링의 미변형 칩두께를 계산하기 위하여 도시한 개념도이다.

&lt;133&gt;

도 10a에 나타난 3축 가공에서 미변형 칩두께는 다음 수학식 32과 같이 계산될 수 있다.

&lt;134&gt;

$$t_c(z) = f_t \cdot \sin \phi \cdot \cos \psi + DR(z)$$

【수학식 32】

&lt;135&gt;

여기서,  $DR(z) = R(z) - R(z + f_t \cdot \sin \psi)$ 이며 이 항은 3차원 가공에서 축방향 이송 성분에 의해 같은 높이에서의 공구 디스크 반경의 변화에 의한 미변형 칩두께의 생성을 의미한다. 이 때,  $z + f_t \cdot \sin \psi \leq 0$  일 경우  $t_c(z) = R(z)$  이다.

<136> 도 10a에 나타난 3축 가공에서 수직 이송 요소에 의해 생기는 미변형 칩두께의 변화를 고려하기 위해 다음 수학식 32에서 보는 바와 같이 공구 축방향에 따른 반경의 변화를 고려하였다.

<137>

$$y_{tm} = \frac{-1}{\tan\phi} x_{tm}$$

$$(x_{tm} - x_{am} + x_a)^2 + (y_{tm} - y_{am} + y_a)^2 = R_{am}^2$$

【수학식 33】

<138>

여기서,  $R_{am} = R(z + m f \sin\phi)$  이다.

<139>

따라서 미변형 칩두께는 도 10b에서 다음 수학식 34와 같이 계산된다.

<140>

$$t_{cm}(i, j, k, m) = R(z) - \sqrt{x_{tm}(m)^2 + y_{tm}(m)^2}$$

$$t_c(z) = \text{Max}[0, \text{Min}(t_{cm}(i, j, k, m))]$$

【수학식 34】

<141>

여기서,  $t_{cm}(i, j, k, m)$ 은 가능한 미변형 칩두께를 의미하고,  $(x_{tm}, y_{tm})$ 은 이전의 날에서 절삭날의 위치( $m=1 \sim n_f$ )를 표시하고,  $t_c$ 는 실제 미변형 칩두께를 표시한다.

<142>

[가공 표면오차 모델]

<143>

다음은 가공 표면오차를 구속변수로 선택할 경우 이러한 표면오차를 예측하기 위한 가공 표면오차 모델을 제시하면 다음과 같다.

<144>

도 11a와 같이 공칭 이송속도에 의해서만 이상적으로 거동한다고 가정할 경우 디스크 요소의 궤적은 원호로 가정할 수 있다. 이러한 가정은 절삭 이송 속도가 공구의 직경에 비해서 아주 작은 경우 적절한 가정이며 다수의 연구자들에 의해 사용되고 있다. 본 발명에서 공구의 런아웃과 힘을 고려하기 위한 가공 표면오차 모델은 절삭력 모델로부터 형성된다. 가공 시 공



구의 휨과 런아웃에 의해 디스크 요소의 중심 좌표는 공칭값에서 벗어나서 도 11b와 같은 거동을 보이게 된다. 그리고 도 11c의 경우는 볼엔드 밀링의 볼 부분의 공구 형상과 공구 경로 간격에 의해 생기는 가공 표면 오차를 보여주고 있다. 본 발명에서는 이러한 가공 상황들을 예측함으로써 절삭 과정 중 발생하는 가공 표면 오차를 산출하였다.

<145>      제1 경우(도 11a)의 표면오차 예측

<146>      평엔드 밀링과 볼엔드 밀링에 의해 발생할 수 있는 커스프(Cusp) 오차(혹은 cutter mark)는 도 12에서 보는 바와 같이 날당 이송량  $f_t$ 와 공구의 반경  $R$ 에 의해 발생된다. 도 12의 커스프 오차,  $C_h$ 는 다음 수학식 35와 같이 계산될 수 있다.

<147>      
$$C_h = R - A$$

$$A = \sqrt{R^2 - \left(\frac{f_t}{2}\right)^2}$$

【수학식 35】

<148>      
$$C_h = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{f_t}{2}\right)^2}$$

<149>      제2 경우(도 11b)의 표면오차 예측

<150>      공구의 셋업 시에 발생하는 공구의 런아웃은 도 13에 나타난 바와 같이 옅셋과 그 각도의 향으로 정의할 수 있다. 공구 런아웃에 의한 공구중심좌표의 변화는 다음 수학식 36과 같다.

<151>      
$$x_\rho(j) = -\rho \sin(\alpha_{run} - \theta(j))$$

$$y_\rho(j) = -\rho \cos(\alpha_{run} - \theta(j))$$

【수학식 36】

<152> 도 14는 공구를 2단 외팔보로 가정하여 정적인 힘이 공구에 부과되었을 때의 공구의 휨을 나타내고 있다. z축 디스크 요소 각각에 부과되는 힘을 이용하여 각 디스크 요소의 위치를 구하는 식은 다음 수학적식 37과 같다.

<153>

$$\begin{aligned}
 X_d(k, j) &= \frac{P_x}{6EI_s} [2 \cdot L_s^3 + 3 \cdot L_p \cdot L_s^2] + \frac{P_x}{2EI_s} [L_s^3 + 2 \cdot L_p \cdot L_s] \cdot (L_f - z) \\
 &+ \frac{P_x}{6EI_f} [L_f - L_p - z]^3 - (L_f - z)^3 + 3 \cdot L_p \cdot (L_f - z)^2] \\
 Y_d(k, j) &= \frac{P_y}{6EI_s} [2 \cdot L_s^3 + 3 \cdot L_p \cdot L_s^2] + \frac{P_y}{2EI_s} [L_s^3 + 2 \cdot L_p \cdot L_s] \cdot (L_f - z) \\
 &+ \frac{P_y}{6EI_f} [L_f - L_p - z]^3 - (L_f - z)^3 + 3 \cdot L_p \cdot (L_f - z)^2]
 \end{aligned}$$

【수학적식 37】

<154> 여기서,  $L_s$ 는 생크(shank)의 길이이고,  $L_f$ 는 날길이를 의미한다. 그리고  $L_p$ 는 날과 생크 부분 사이의 경계와 절삭력이 작용하는 지점까지의 거리이다.  $I_s$ 는 생크부분의 관성 모멘트이고,  $I_f$ 는 날부분의 관성 모멘트, 그리고  $E$ 는 영률(Young's modulus)을 의미한다.

<155> 공구의 움직임에 따라서 이미 계산된 미변형 칩두께를 구하는 과정에서 얻어진 절삭날의 좌표를 이용하여 가공 표면의 오차를 보다 손쉽게 예측할 수 있다. 실제 가공의 경우, 가공 표면오차는 절삭날이 가공 표면을 지나게 되는 절삭날 위치각이 "0"인 순간에서의 절삭날의 위치( $p_{x,k}$ ,  $p_{y,k}$ )<sub>i</sub>를 이용하여 얻어질 수 있다. 그리고 각 디스크 요소에서의 ( $p_{x,k}$ ,  $p_{y,k}$ )<sub>i</sub> 좌표를 이용하여 3차원 가공 오차를 형성할 수 있다. ( $p_{x,k}$ ,  $p_{y,k}$ )<sub>i</sub> 좌표는 실제 공구의 날이 지난 위치, 즉 가공 표면 오차를 포함한 위치를 나타내며, 이러한 가공 표면 오차는 상기 수학적식 36과 수학적식 37을 이용하여 다음 수학적식 38과 같이 계산될 수 있다.

<156>

【수학적식 38】  $E(j, k) = y_p(j) + Y_d(j, k)$

<157> 제3 경우(도 11c)의 표면오차 예측

<158> 도 15a 및 15b는 형성된 커스프(Cusp)를 보여주며 도 15c는 커스프의 높이를 계산하기 위한 방법을 보여준다. 도 14에서 공구 경로 간격 TPD와 날당 이송량  $f_t$ 에 의해 공구 중심간의 거리는 변화하게 되고 이것을 커스프의 높이에 영향을 준다. 공구 중심간의 거리가 최대일 때 가장 높은 커스프의 높이가 생성된다. 커스프의 높이는 다음 수학식 39에 의해 계산될 수 있다.

<159>

$$D = \sqrt{(TPD)^2 + f_t^2}$$

$$A = \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

$$C_h = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

【수학식 39】

<160> [ME Z-map 모델]

<161> ME(Moving Edge node) Z-map의 기본 개념은 도 16과 같이 공구와 접촉하는 격자 점 가운데 가장 바깥쪽에 있는 점을 모서리 점(edge node)으로 정의하고, 모서리 점을 공구 궤적의 윤곽선상으로 이동시키는 것이다. 모서리 점은 현재 점의 위치각인  $\theta_m$ 의 방향으로 이동시키며, 이동 후 (i, j) 위치에 있는 격자 점의 좌표는 수학식 40과 같이 변경된다.

<162>

$$x = i \cdot g + a_x$$

$$y = j \cdot g + a_y$$

【수학식 40】

<163> 여기서  $g$ 는 격자 간격이며,  $a_x$ 와  $a_y$ 는 도 16에 나타난 모서리 점 좌표의 수정 값이다.

$a_x$ 와  $a_y$  값은 격자 간격보다 작은 값이어야 한다.

<164> ME Z-map의 시뮬레이션 과정은 먼저 격자 점을 순서대로 검색하고, 격자 점이 도 17 (a)와 같이 공구 이동 면에서의 모서리 영역 내에 위치하면 모서리 점으로 정의한다. 도 17 (b)

는 모서리 점의 이동 후 변화된 격자 점들의 위치를 나타낸 것이며, 현재 공구 이동 면 내부에 위치할 경우 내부 점으로 재정의한다. 내부 점으로의 전환을 통해 필요 없는 부분에서 데이터 구조가 복잡해지는 것을 없앨 수 있다. 즉 ME Z-map에서는 도 17 (b)와 같이 피삭재 형상을 결정짓는 부분에서만 모서리 점이 사용되고, 나머지 부분에서는 일반 격자 점이 사용된다.

<165> 모서리 점을 이동시키는 과정은 다음과 같다. 먼저 선택된 격자 점이 모서리 영역에 포함되는지 여부를 판단한다. 공구 중심에서 격자 점까지의 거리와 공구 반지름의 차이가 도 18에 나타나 있는 현재 격자 점의 움직임 가능 거리보다 작을 경우 이 격자 점을 모서리 점으로 정의한다. 도 18에서 격자 점의 움직임 가능 거리는 수학식 41과 같이 정의할 수 있다.

<166>

$$l_p, l_n = \begin{cases} \frac{-a_x \cos \theta_m \pm g |\cos \theta_m|}{\cos^2 \theta_m}, & \text{for } C \geq 0 \\ \frac{-a_y \sin \theta_m \pm g |\sin \theta_m|}{\sin^2 \theta_m}, & \text{for } C < 0 \end{cases}$$

【수학식 41】

<167> 여기서,  $C = |a_x + l_o \cos \theta_m| - |a_y + l_o \sin \theta_m|$ ,  $l_o = g / \max(|\cos \theta_m|, |\sin \theta_m|)$  이다.

<168> 여기서,  $l_o$ 는 초기 점( $a_x$ 와  $a_y$ 가 0인 경우)의 움직임 가능 거리이고,  $l_p$ 와  $l_n$ 는 각각 양과 음의 방향으로의 움직임 가능 거리이다. 선택된 격자 점이 모서리 점일 경우에는  $a_x$ 와  $a_y$ 의 값을 수학식 42와 같이 변경함으로써 격자 점을 공구의 모서리로 움직인다.

<169>

$$\begin{aligned} a'_x &= a_x + (r_d - d_n) \cdot \cos \theta_m \\ a'_y &= a_y + (r_d - d_n) \cdot \sin \theta_m \end{aligned}$$

【수학식 42】

<170> 여기서,  $r_d$ 는 공구의 반지름이고,  $d_n$ 는 선택된 격자 점과 공구 중심 사이의 거리이다.

<171> 밀링 공정의 절삭력을 예측하기 위해서는 시뮬레이션을 통해 절삭 해석 정보를 산출해야 한다. 주요 절삭 해석 정보로는 절입각(Entry angle), 배출각(Exit angle), 절삭 깊이(Axial

depth of cut) 등이 있다. ME Z-map을 이용하여 절삭 해석 정보를 계산하는 과정은 다음과 같다.

<172> 첫째, 선택된 격자 점이 모서리 영역에 포함되는지 여부를 판단한다.

<173> 둘째, 모서리 점일 경우 격자 점을 이동하고 격자 점의 높이 값을 변경한다.

<174> 셋째, 모서리 점일 경우 이동 방향의 각도를 저장한다.

<175> 넷째, 저장된 이동 방향 각도를 이용하여 절입각과 배출각을 계산한다.

<176> 절입각과 배출각이 하나씩만 발생하는 절삭 조건에서는 저장된 이동 방향 각도 가운데 가장 큰 값을 절입각으로, 가장 작은 값을 배출각으로 결정한다. 그러나 도 19와 같이 절입각과 배출각이 두 개 이상인 경우에는 저장된 이동 방향 각도의 간격이 수학적 식 43의 조건을 만족시킬 경우에  $\theta_{n-1}$ 을 배출각으로  $\theta_n$ 을 그 다음의 절입각으로 결정한다.

<177>

$$\theta_n - \theta_{n-1} > 2 \sin^{-1} \left( \frac{\sqrt{2}g}{r_d} \right)$$

【수학적 식 43】

<178> 여기서,  $\theta_n$ 은 저장되어 있는 이동 방향 각도의 n번째 값이다.

<179> 평엔드 밀링의 경우에는 모든 디스크 요소가 같은 절입각과 배출각을 가지게 되지만, 볼엔드 밀링의 경우에는 도 20과 같이 각 디스크 요소가 다른 반지름을 가지므로 각 디스크 요소에서 절입각과 배출각을 계산하여야 한다. 그런데 k번째 디스크의 절입각과 배출각을 정확히 계산하기 위해서는 k번째와 k-1번째 디스크 요소 반지름의 차이가 반드시 격자 간격보다 커야 한다. (격자 간격보다 작을 경우 격자 점이 충분하지 않아 오차가 크게 발생한다.) 따라서 수학적 식 44를 만족하도록 도 20과 같이 디스크 요소를 그룹으로 묶어서 절입각과 배출각을 계산하

고 같은 그룹에 속한 디스크 요소들은 같은 절입각과 배출각을 공유함으로써 모든 디스크 요소가 정확한 절입각과 배출각을 가지도록 하였다.

&lt;180&gt;

$$r_g(n) - r_g(n-1) > \sqrt{2}g$$

【수학식 44】

&lt;181&gt;

여기서,  $r_g(n)$ 은  $n$ 번째 디스크 그룹에서 가장 큰 디스크의 반지름이다.

&lt;182&gt;

절삭해석변수 계산과정은 도 21과 같은 순서도로 나타내어진다.

&lt;183&gt;

도 21에서 CSS는 Cutter Swept Surface의 약자로 논문 [Y. C. Chung, J. W. Park, H. Shin, B. K. Choi, "Modeling the surface swept by a generalized cutter for NC verification," Computer-Aided Design, Vol. 30, No. 8, pp.587-594, 1998.]에 언급되어 있다. 즉 CSS는 공구 이동 궤적면으로 볼 엔드밀, 평 엔드밀 등이 NC 코드에 의해 3차원상의 어떤 점에서 다른 어떤 점으로 직선 이동할 때 형성되는 곡면을 의미한다.

&lt;184&gt;

절삭 해석 변수를 계산하는 과정에서 공구의 움직임에 따라 임의의 점에서의 높이 값( $z$ -값)을 알아야 하므로 CSS 계산 방법을 도입하였다. 즉,  $z$ -값은 임의의 점에서의 높이 값을 의미하며, 현재 고려하고 있는 점의 높이 값을 알아야만 그 점이 가공에 포함되는지 여부를 알 수 있으므로 (현재 점의 높이 값보다 현재 점에서의 공구 이동 궤적면 높이가 작으면 높이 값을 공구 이동 궤적면의 높이 값으로 변경하고, 현재 점은 가공 영역에 포함.)  $z$ -값을 계산한다.

&lt;185&gt;

이상 설명한 바와 같이, 구속변수로 사용될 절삭력과 가공 표면오차에 대한 모델이 계산되고, 이러한 구속변수 모델에 절삭해석정보를 산출하여 제공할 ME Z-map 모델이 준비된 경우 이하에서 설명될 이송속도 스케줄링 알고리즘을 통하여 주어진 기준값을 만족하는 최적의 이송속도를 산출할 수 있다.

<186> 구속변수가 절삭력으로 선택되었을 경우 절삭력 모델을 이용하여 절삭력의 최대합력을 조절하기 위한 이송속도를 구하여야 한다. 이 때 공구회사에서 제시하는 공구의 항절력 (transverse rupture strength)을 이용하여 수학적 식 45와 같이 먼저 두가지 기준 절삭력을 고려한다.

<187>

$$RF_1 = SF \cdot TRS \cdot S_1$$

【수학적 식 45】

$$RF_2 = SF \cdot TRS \cdot S_2$$

<188> 여기서  $RF_1$ 은 공구의 몸체가 부러지는 것을 방지하기 위해 설정하는 기준 절삭력이고  $RF_2$ 는 공구의 날끝 부분이 파손되는 것을 막기 위해 추가하는 기준 절삭력이다. 그리고 TRS는 공구의 항절력(Transverse Rupture Strength)을 의미하고, SF는 안전계수(Safety Factor)를 나타낸다. 또한  $S_1$ 은 날부의 등가 단면적을 보여주고,  $S_2$ 는 단위 디스크의 날에서 가정된 공구 파단이 발생하는 위치( $F_c$ )의 단면적을 나타내는 것이며, 수학적 식 46와 같이 근사하여 얻을 수 있다.

<189>

$$S_1 = \pi \left( \frac{RL_1}{2} \right)^2$$

$$S_2 = RL_2 \cdot D_a$$

【수학적 식 46】

<190> 여기서,  $D_a$ 는 단위 디스크의 높이를 가리키며,  $RL_1$ 과  $RL_2$ 는 도 22a, 22b를 참조로 다음과 같이 계산될 수 있다.

<191> 도 22a 및 22b는 공구의 항절력을 고려한 기준 절삭력을 결정하기 위해 도시한 개념도이다.

<192> 도 22a에서  $RL_1$ 은 등가 반경을 가리킨다. (예를 들면, 공구의 반경이 R일때 평엔드 밀링의 경우  $0.79R$ 로 계산된다) 도 22b에서 a는 상면각, b는 1차 여유각, c는 2차 여유각을 가리

킨다. 그리고  $L_1$ 은 1차 여유면의 길이,  $L_2$ 는 2차 여유면의 길이를 가리키고  $RL_2$ 는 파단 지점이  $F_c$ 로 주어졌을 때 다음과 같이 계산된다.

<193> 먼저  $RL_2$ 의 양끝점을  $E_1(x_1, y_1)$ ,  $E_2(x_2, y_2)$ 라고 할 때  $RL_2$ 의 길이는 두 점 사이의 거리를 이용하여 계산되어 진다.  $E_1$ 은( $F_c \cdot \tan a$ ,  $-F_c$ ) 이고  $E_2$ 는  $RL_2$ 를 나타내는 직선의 방정식과 1차 여유면을 나타내는 직선의 방정식의 교차점 또는 2차 여유면을 나타내는 직선의 방정식의 교차점으로 계산된다.

<194>  $RL_2$ 를 나타내는 직선의 방정식과 1차 여유면을 나타내는 직선의 방정식의 교차점은 수학식 47과 같다.

<195>

$$(x_1, y_1) = \left( \frac{F_c (1 + \tan^2 a)}{(\tan a + \tan b)}, -\tan b \cdot x_1 \right)$$

【수학식 47】

<196>

$$\frac{L_1 \tan a (\tan a + \tan b)}{(\tan^2 a + 1)} < F_c \cdot \tan a$$

그리고, 일 경우

<197>  $RL_2$ 를 나타내는 직선의 방정식은 2차 여유면을 나타내는 직선의 방정식과 교차하며 교차점은 수학식 48과 같이 계산된다.

<198>

$$(x_2, y_2) = \left( \frac{1}{(\tan a + \tan c)} \cdot (L_1 (\tan c - \tan b) + F_c (1 + \tan^2 a)), \right. \\ \left. -x_2 \tan c + L_1 (\tan c - \tan b) \right)$$

【수학식 48】

<199>  $RF_2$ 는 공구 상면에 수직인 힘으로 계산되기 때문에 XY 평면에서의 합력은 수학식 49와 같이 계산된다.

<200>

$$RF_2' = N_d \cdot RF_1 \cdot \sqrt{(1 + B_1^2)}$$

【수학식 49】



- <201> 여기서  $B_1$ 은 수학식 30에서 사용된 변수이고,  $N_d$ 는 가공 시편에 물린 공구의 축방향 디스크 요소들의 수를 의미하고 상기 ME Z-map 모델로부터 계산된다.
- <202> 따라서 수학식 50과 같이  $RF_1$  과  $RF_2'$  중 작은 값이 최종 기준 절삭력이 된다.
- <203> **【수학식 50】** 기준 절삭력 =  $Min(RF_1, RF_2')$
- <204> 이러한 방식으로 기준 절삭력이 정해지면 기준 절삭력을 만족하는 이송속도를 절삭력 모델에 기초한 이송속도 스케줄링 방법을 이용하여 찾을 수 있다.
- <205> 한편, 구속변수로 표면오차를 선택하였을 경우 가공 표면오차 모델을 이용하여 표면오차의 최대값을 조절하기 위한 이송속도를 구할 수 있다. 현장 작업자가 NC 코드를 작성할 때 황삭, 중삭, 정삭에 따라 각각 다른 허용 오차를 부여한다. 이 때 허용 오차로부터 가공 표면오차 모델을 이용하여 주어진 허용 오차를 만족하는 이송속도를 계산한다. 표면오차의 최대값을 조절할 경우 전체의 가공오차가 함께 조절되는 효과가 나타난다.
- <206> [이송속도 스케줄링 알고리즘]
- <207> 도 23은 구속변수(절삭력 또는 가공 표면오차)를 조절하기 위해 기준값을 만족하는 이송속도를 찾기 위한 알고리즘을 보여준다. 구속 변수값을 계산하기 위해서는 절삭력 모델과 가공 표면오차 모델이 사용된다. 도 23에 제시된 알고리즘은 주어진 NC 코드에서 절삭력 조절, 공구 휨 조절, 그리고 가공 표면오차 조절을 위해 사용될 수 있다.
- <208> 본 발명에서는 이송속도 스케줄링을 위한 시뮬레이션 시간 단축 방안을 고안하였다. 이 알고리즘은 주어진 간격에서 공구 한 회전시 구속 변수(절삭력/표면 오차)의 최대 값이 발생하는 공구 경로상의 위치를 먼저 찾고 그 위치에서 최대 구속 변수값을 기준값으로 조절하기 위한 최적 이송속도를 부여하는 것이다. 구속 변수값을 예측할 때 한 회전단위에서 항상 0도에

서 360도까지 시뮬레이션을 하는데 이때 공구의 힘을 계산하는 데 많은 시간이 소요된다. 이러한 반복 계산의 수가 늘어남으로 시뮬레이션 시간이 늘어나는 것을 방지하기 위해 시뮬레이션 시간 내에서 특정 공구 경로상의 위치와 공구 한 회전에서의 특정 위치각에서만 이송속도 스케줄링을 수행하는 것이다.

<209> 본 발명의 절삭력 모델과 표면오차 모델에서 실제 미변형 칩두께는 도 6과 도 10에서와 같이 공구의 힘과 런아웃을 고려하여 이전 날들이 지나간 위치를 고려하여 미변형 칩두께를 계산한다. 이 방식은 절삭력 또는 표면 오차 예측의 정밀도를 높이지만 공구의 힘을 계산할 때 정해에 수렴하기 위해 반복 계산하는 알고리즘 때문에 계산시간이 늘어난다. 따라서 공구 경로상의 구속 변수의 최대 값의 발생 위치 및 한 회전에서의 구속 변수의 최대값의 발생 위치각을 추정할 때에는 수학적 식 10과 수학적 식 32와 같은 기하학적 미변형 칩두께를 계산한다. 도 23에서 보듯이 이송 속도 스케줄링을 수행할 때 먼저 사용자가 임의로 시뮬레이션 시간 간격을 설정하게 되면 주어진 시간간격에서 공구 경로를 따라 기하학적 미변형 칩두께 모델식인 수학적 식 10 또는 수학적 식 32를 이용하여 구속 변수값을 예측하면서 구속 변수의 최대 값이 발생하는 위치를 찾은 뒤 그 위치에서 구속 변수의 최대 값 발생 위치각을 찾는다. 그 뒤 최대 구속 변수값 발생 위치각에서만 물리적 미변형 칩두께 모델인 수학적 식 12 또는 수학적 식 34를 이용하여 시뮬레이션 함으로써 기준 값을 만족하는 이송 속도를 빠르게 찾을 수 있다.

<210> 주어진 절삭 깊이 및 절삭 속도에서 이송 속도가 증가함에 따라 구속 변수의 최대 값도 증가하는 경향이 있다. 이를 이용하여 기준 절삭력에 해당하는 이송속도를 선형 탐색(linear search)을 통하여 찾아갈 수 있다. 도 23에서와 같이 임의의 이송속도  $f_1$  과  $f_2$  에서의 최대 구속 변수값이  $CVV_1$ 과  $CVV_2$ 일 때 기준값  $RV$ 에 해당하는 이송속도로써  $f_{next}$  는 다음 수학적 식 51을 이용하여 근사할 수 있다.

<211>

$$f_{next} = f_1 + \frac{(RV - CVV_1)(f_2 - f_1)}{CVV_2 - CVV_1}$$

【수학식 51】

<212> 도 23에서와 같이  $f_{next}$  에서 계산된 구속 변수 값이 기준값과 다른 경우에는  $f_1$ ,  $f_2$  중  $f_{next}$  와 보다 가까운 점을 새로운  $f_1$  으로 정하고,  $f_{next}$  를  $f_2$  에 대입하여 새로운  $f_{next}$  를 구하는 과정을 반복한다.

<213> 즉, 이송속도  $f_{next}$  일 경우의 구속변수값  $CVV_{next}$  를 산출하고 적절한 오차한계를 설정한 다음, 하기 수학식 52를 이용하여 상기 구속변수값  $CVV_{next}$  가 기준값  $RV$  와 비교할 때 오차한계 이내인지 판단하여, 오차한계 이내일 경우 상기 이송속도  $f_{next}$  를 NC 코드에 부여하고, 오차한계 이내가 아닐 경우 기준값  $RV$  가 구속변수값  $CVV_{next}$  보다 크면 이송속도  $f_2$  를  $f_{next}$  로 대체하고, 기준값  $RV$  가 구속변수값  $CVV_{next}$  보다 작으면 이송속도  $f_1$  를  $f_{next}$  로 대체하여 상기  $f_{next}$  를 구하는 과정을 반복한다.

<214>

$$\frac{CVV_{next} - RV}{RV} < \text{오차한계}$$

【수학식 52】

<215> 이송속도는 자연수 값이므로 이와 같은 방법을 이용하면 빠르게 최적 이송속도를 찾을 수 있다.

<216> 제어기에 의한 자동 가감속은 도 24의 A, C 구간과 같이 지수 함수 형태로 이루어진다. 따라서 각 블록이 시작된 후 지정된 이송속도에 도달하는데 걸리는 시간은 정해진 가감속 시간  $T_c$  보다 조금 길어지게 된다. 그리고 블록과 블록 사이에서는 원활한 속도 변화를 위해 도 24의 B구간과 같이 두 블록의 감속 구간과 가속 구간을 중첩시켜 이송속도를 구하게 된다. 따라서 NC 코드의 모든 블록에서는 가공 시 항상 원하는 속도에 도달하는데  $T_c$  정도의 가감속 시

간이 소요된다. 최근 개발되고 있는 공작기계에서는 룩 어헤드(Look Ahead) 알고리즘이 적용되어 이러한 가감속에 따른 문제가 어느 정도 해결되고 있다. 그러나 룩 어헤드(Look Ahead) 기능이 없는 공작 기계에서는 가공 중에 이러한 가감속 특성을 반드시 고려해야 하며, 룩 어헤드(Look Ahead) 기능이 있는 경우에도 가감속 특성을 완전히 무시할 수는 없다.

<217> 제어기에서 룩 어헤드(Look Ahead) 기능을 지원하지 않으면 공작기계의 가감속 시간보다 작은 블록에서는 원하는 이송속도를 얻을 수 없다. 그러므로 NC 코드를 분할하여 이송속도를 최적화 할 경우에는 반드시 블록의 크기를 가감속 시간보다 크게 해야 한다. 물론 한 블록을 일정한 이송속도로 가공하기 위해서는 적어도 블록의 크기가 가감속 시간의 2~3배 이상이 되어야 하며 블록의 크기가 클수록 이송속도가 일정한 구간은 길어진다. 따라서 본 발명에서는 구속 변수값의 변화량이 기준값을 넘어갈 경우 NC 코드의 블록을 분할하되, 분할되는 블록의 크기가 가감속을 고려하여 제한된 크기보다 작을 경우에는 블록이 제한된 크기보다 커지는 부분에서 분할하도록 한다.

<218> 이상을 통해 본 발명의 바람직한 실시예에 대하여 설명하였지만, 본 발명은 이에 한정되는 것은 아니고 특허청구범위와 발명의 상세한 설명 및 첨부한 도면의 범위 안에서 여러 가지로 변형하여 실시하는 것이 가능하고 이 또한 본 발명의 범위에 속하는 것은 당연하다.

#### 【발명의 효과】

<219> 이상 설명한 바와 같이 본 발명에 따른 이송속도 스케줄링 방법에 의하면, 절삭력 모델 및 표면오차 모델을 기반으로 이송속도 스케줄링 모델을 개발함으로써 CNC 가공 시 가공 정밀도와 생산성을 향상시킬 수 있다.

**【특허청구범위】****【청구항 1】**

CAD/CAM 시스템으로부터 제공되는 가공물의 형상과 공구의 경로를 지시하는 NC 코드에 따라 수행되는 CNC 가공공정의 이송속도 스케줄링 방법에 있어서,

구속변수 (constraint variable)를 선택하고 이 구속변수에 대한 기준값을 입력하는 단계;

ME Z-map 모델링을 통하여 최대 구속변수값(CVV)이 발생하는 절삭해석정보(cutting configuration)를 추정하는 단계;

상기 추정된 절삭해석정보를 전달받아 구속변수 모델링을 통하여 최대 구속변수값이 발생하는 특정 회전각( $\phi_s$ )을 추정하는 단계;

상기 추정된 특정 회전각( $\phi_s$ )에서 상기 구속변수의 기준값을 만족하도록 하는 이송속도를 산출하는 단계; 및

상기 산출된 이송속도를 NC 코드에 부여하는 단계

를 포함하는 이송속도 스케줄링 방법

**【청구항 2】**

제 1 항에 있어서,

상기 이송속도를 산출하는 단계는,

임의의 이송속도  $f_1$ 과  $f_2$  ( $f_1 < f_2$ ) 를 입력하는 제1 단계;

상기 특정 회전각에서 상기 이송속도  $f_1$ 과  $f_2$ 에 각각 대응하는 최대 구속변수값  $CVV_1$ 과  $CVV_2$ 를 산출하는 제2 단계;

하기 식을 이용하여 상기 구속변수값의 기준값  $RV$ 에 해당하는 이송속도  $f_{next}$ 를 근사(近似)하는 제3 단계;

$$f_{next} = f_1 + \frac{(RV - CVV_1)(f_2 - f_1)}{CVV_2 - CVV_1}$$

상기 이송속도  $f_{next}$  일 경우의 구속변수값  $CVV_{next}$ 를 산출하는 제4 단계; 및

하기 식을 이용하여 상기 구속변수값  $CVV_{next}$ 가 기준값  $RV$ 와 비교할 때 오차한계 이내인지 판단하여, 오차한계 이내일 경우 상기 이송속도  $f_{next}$ 를 NC 코드에 부여하고, 오차한계 이내가 아닐 경우 기준값  $RV$ 가 구속변수값  $CVV_{next}$  보다 크면 이송속도  $f_2$ 를  $f_{next}$ 로 대체하여 제1 단계로 분기하고, 기준값  $RV$ 가 구속변수값  $CVV_{next}$  보다 작으면 이송속도  $f_1$ 를  $f_{next}$ 로 대체하여 제1 단계로 분기하는 제5 단계

$$\frac{CVV_{next} - RV}{RV} < \text{오차한계}$$

를 포함하는 이송속도 스케줄링 방법.

### 【청구항 3】

제 1 항에 있어서,

상기 ME Z-map 모델링을 통하여 절삭해석정보를 추정하는 단계는,

공구와 접촉하는 격자점을 순서대로 검색하는 단계;

선택된 격자점이 모서리 점(공구 이동면에서의 모서리 영역에 포함되는 점)인지 여부를 판단하는 단계;

모서리 점일 경우 상기 격자점을 이동하고 이 격자점의 높이 값을 변경하는 단계;

이동하는 모서리 점의 이동 방향의 각도를 저장하는 단계;

저장된 이동 방향의 각도를 이용하여 절삭해석정보를 계산하는 단계

를 포함하는 이송속도 스케줄링 방법.

#### 【청구항 4】

제 3 항에 있어서,

상기 ME Z-map 모델링을 통하여 추정되는 절삭해석정보는 절입각(Entry angle), 배출각(Exit angle) 또는 절삭 깊이(Axial depth of cut) 중 적어도 하나인 것을 특징으로 하는 이송속도 스케줄링 방법.

#### 【청구항 5】

제 3 항에 있어서,

상기 모서리 점은, 공구 중심에서 격자점까지의 거리와 공구 반지름의 차이가 현재 격자점의 움직임 가능 거리보다 작을 경우의 격자점으로 정의되는 것을 특징으로 하는 이송속도 스케줄링 방법.

#### 【청구항 6】

제 1 항에 있어서,

상기 구속변수로는 절삭력 또는 가공 표면 오차가 선택되는 것을 특징으로 하는 이송속도 스케줄링 방법.

## 【청구항 7】

CAD/CAM 시스템으로부터 제공되는 가공물의 형상과 공구의 경로를 지시하는 NC 코드에 따라 수행되는 CNC 가공공정의 절삭력(cutting force)을 조절하기 위한 이송속도 스케줄링 방법에 있어서,

기준절삭력을 입력하는 단계;

ME Z-map 모델링을 통하여 최대 절삭력이 발생하는 절삭해석정보(cutting configuration)를 추정하는 단계;

상기 추정된 절삭해석정보를 전달받아 절삭력 모델링을 통하여 최대 절삭력이 발생하는 특정 회전각을 추정하는 단계;

상기 추정된 특정 회전각에서 상기 기준절삭력을 만족하도록 하는 이송속도를 산출하는 단계; 및

상기 산출된 이송속도를 NC 코드에 부여하는 단계

를 포함하는 이송속도 스케줄링 방법

## 【청구항 8】

제 7 항에 있어서,

상기 기준절삭력은 공구의 몸체가 부러지는 것을 방지하기 위해 설정하는 기준절삭력  $RF_1$ 과 공구의 날끝 부분이 파손되는 것을 막기 위해 부가하는 기준 절삭력  $RF_2$ 중 작은 값을 선택하는 이송속도 스케줄링 방법.

여기서,  $RF_1$ 과  $RF_2$ 는 하기 식과 같이 계산될 수 있으며,



$$RF_1 = SF \cdot TRS \cdot S_1$$

$$RF_2 = SF \cdot TRS \cdot S_2$$

이 때, SF는 안전계수(safety factor), TRS는 공구의 항절력(transverse rupture strength)을 의미하고, S<sub>1</sub>은 날부의 등가 단면적, S<sub>2</sub>는 단위 디스크의 날에서 가정된 공구 파단이 발생하는 위치(F<sub>c</sub>)의 단면적을 의미한다.

#### 【청구항 9】

제 7 항에 있어서,

상기 공구는 평엔드 밀링 공구로서, 회전각에 따른 각 방향 절삭력 성분이 하기 수학식을 따르는 절삭력 모델링이 적용되는 이송속도 스케줄링 방법.

$$F_x(j) = \sum_k \sum_i F_x(i, j, k)$$

$$F_y(j) = \sum_k \sum_i F_y(i, j, k)$$

$$F_z(j) = \sum_k \sum_i F_z(i, j, k)$$

여기서 ,

$$F_x(i, j, k) = [C_1 K_n \cos(\phi - \alpha_r) + K_f K_n C_3 \cos \phi - K_f K_n C_4 \sin(\phi - \alpha_r)] t_c(\phi) B_1$$

$$F_y(i, j, k) = [C_1 K_n \sin(\phi - \alpha_r) + K_f K_n C_3 \sin \phi + K_f K_n C_4 \cos(\phi - \alpha_r)] t_c(\phi) B_1$$

$$F_z(i, j, k) = [-C_2 K_n + K_f K_n C_5] t_c(\phi) B_1$$

이고, 이 때

$$C_1 = \frac{\cos \theta_h}{\sin \theta_{hk}}, \quad C_2 = \frac{\sin \theta_h}{\sin \theta_{hk}} \cdot \cos \alpha_r$$

$$C_3 = \sin \theta_h (\sin \theta_c - \cos \theta_c \cot \theta_{th})$$

$$C_4 = \frac{\cos \theta_c}{\sin \theta_{th}}$$

$$C_5 = \cos \theta_h (\sin \theta_c - \cos \theta_c \cot \theta_{th})$$

$$\cos \theta_{th} = \sin \alpha_r \cdot \sin \theta_h \text{ 이다.}$$

#### 【청구항 10】

제 9 항에 있어서,

절삭력 계수  $K_n$ ,  $K_f$ ,  $\theta_c$ 는 하기 수학식으로부터 산출할 수 있는 이송속도 스케줄링 방법.

$$\ln(K_n(i, j, k)) = A_1 - (A_1 - A_2)e^{-(A_3 t_c(i, j, k))^{A_4}}$$

$$K_f(i, j, k) = B_1 - (B_1 - B_2)e^{-(B_3 t_c(i, j, k))^{B_4}}$$

$$\theta_c(i, j, k) = C_1 - (C_1 - C_2)e^{-(C_3 t_c(i, j, k))^{C_4}}$$

#### 【청구항 11】

제 7 항에 있어서,

상기 공구는 볼랜드 밀링 공구로서, 회전각에 따른 각 방향 절삭력 성분이 하기 수학식을 따르는 절삭력 모델링이 적용되는 이송속도 스케줄링 방법.

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{Bmatrix}$$

여기서 ,

$$K_1 = K_n$$

$$K_2 = \cos \theta_c K_n K_f$$

$$K_3 = \sin \theta_c K_n K_f$$

$$A_{11} = B_1 \sum_k \sum_i (\cos \alpha_r \cos \phi \cos \theta_h + \sin \alpha_r \sin \phi) \cdot t_c(\phi)$$

$$A_{12} = B_1 \sum_k \sum_i (\sin \alpha_r \frac{1}{f_2} \cos \phi \cos \theta_h - \frac{1}{f_2} \cos \alpha_r \sin \phi - \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r \cos \phi \sin \theta_h) \cdot t_c(\phi)$$

$$A_{13} = B_1 \sum_k \sum_i (-\frac{f_1}{f_2} \sin \phi + \frac{1}{f_2} \cos \phi \sin \theta_h) \cdot t_c(\phi)$$

$$A_{21} = B_1 \sum_k \sum_i (\cos \alpha_r \sin \phi \cos \theta_h - \sin \alpha_r \cos \phi) \cdot t_c(\phi)$$

$$A_{22} = B_1 \sum_k \sum_i (\sin \alpha_r \frac{1}{f_2} \sin \phi \cos \theta_h + \frac{1}{f_2} \cos \alpha_r \cos \phi - \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r \sin \phi \sin \theta_h) \cdot t_c(\phi)$$

$$A_{23} = B_1 \sum_k \sum_i (\frac{f_1}{f_2} \cos \phi + \frac{1}{f_2} \sin \phi \sin \theta_h) \cdot t_c(\phi)$$

$$A_{31} = B_1 \sum_k \sum_i (-\sin \theta_h \cos \alpha_r) \cdot t_c(\phi)$$

$$A_{32} = B_1 \sum_k \sum_i (-\sin \alpha_r \frac{1}{f_2} \sin \theta_h - \frac{f_1}{f_2} \cos \alpha_r \cos \theta_h) \cdot t_c(\phi)$$

이다.

#### 【청구항 12】

제 11 항에 있어서,

절삭력 계수  $K_n$ ,  $\theta_c$ ,  $K_f$ 는 하기 수학식으로부터 산출할 수 있는 이송속도 스케줄링 방법.

$$K_n = K_1$$

$$\theta_c = \tan^{-1}\left(\frac{K_3}{K_2}\right)$$

$$K_f = \frac{K_2}{\cos\theta_c K_n}$$

### 【청구항 13】

CAD/CAM 시스템으로부터 제공되는 가공물의 형상과 공구의 경로를 지시하는 NC 코드에 따라 수행되는 CNC 가공공정의 가공 표면오차(machined surface error)를 조절하기 위한 이송 속도 스케줄링 방법에 있어서,

기준 표면오차를 입력하는 단계;

ME Z-map 모델링을 통하여 최대 표면오차가 발생하는 절삭해석정보(cutting configuration)를 추정하는 단계;

상기 추정된 절삭해석정보를 전달받아 가공 표면오차 모델링을 통하여 최대 표면오차가 발생하는 특정 회전각을 추정하는 단계;

상기 추정된 특정 회전각에서 상기 기준 표면오차를 만족하도록 하는 이송속도를 산출하는 단계; 및

상기 산출된 이송속도를 NC 코드에 부여하는 단계

를 포함하는 이송속도 스케줄링 방법

### 【청구항 14】

제 13 항에 있어서,

상기 공구는 평엔드 밀링 공구로서, 커스프(cusp) 오차( $C_h$ )가 하기 수학적식을 따르는 가공 표면오차 모델링이 적용되는 이송속도 스케줄링 방법.

$$C_h = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{f_t}{2}\right)^2}$$

여기서,  $R$ 은 공구의 반경,  $f_t$ 는 날당 이송량을 나타낸다.

#### 【청구항 15】

제 13 항에 있어서,

상기 공구는 볼엔드 밀링 공구로서, 커스프(cusp) 오차( $C_h$ )가 하기 수학적식을 따르는 가공 표면오차 모델링이 적용되는 이송속도 스케줄링 방법.

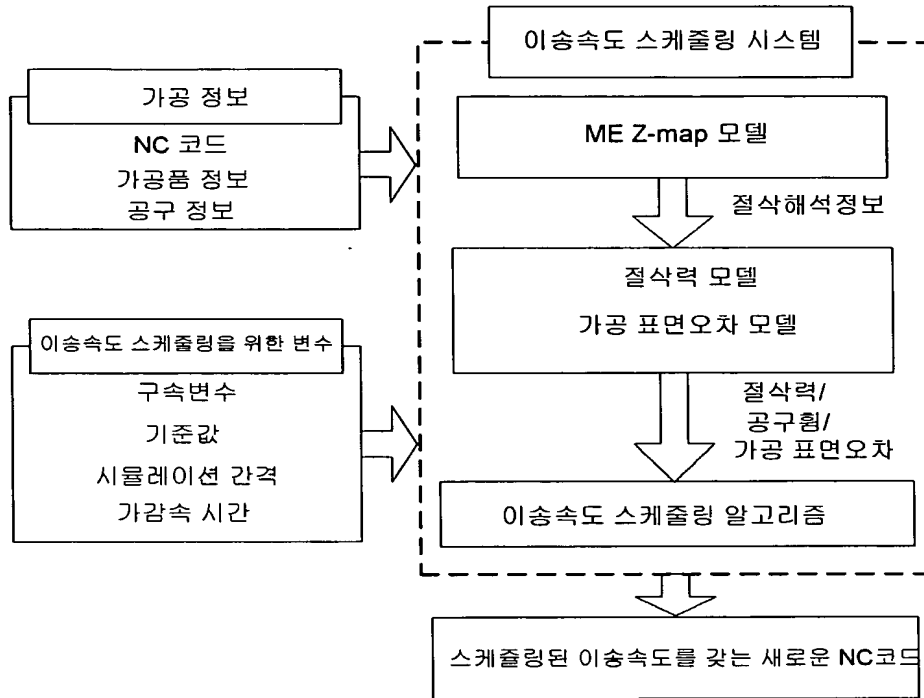
$$C_h = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

여기서,  $R$ 은 공구의 반경,  $D = \sqrt{(TPD)^2 + f_t^2}$  이고,

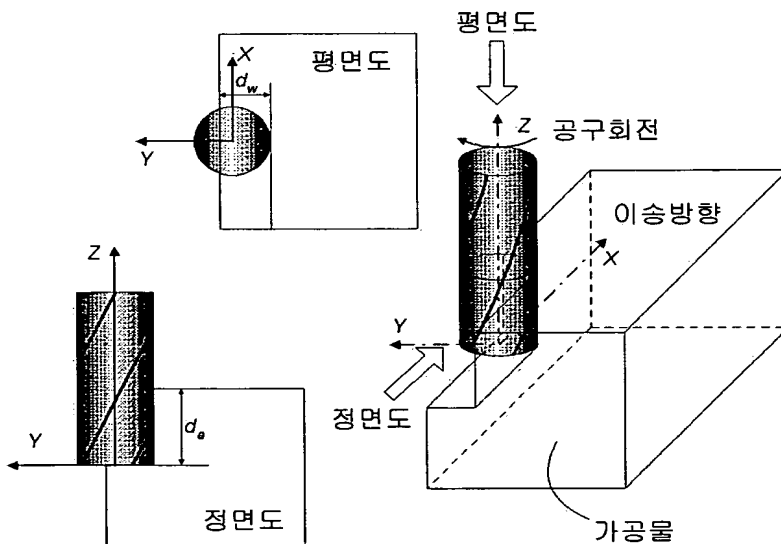
$TPD$ 는 공구 경로간 간격이다.

【도면】

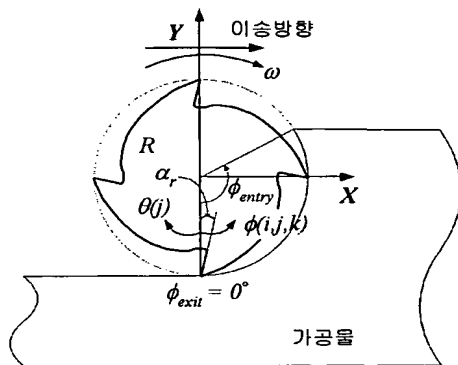
【도 1】



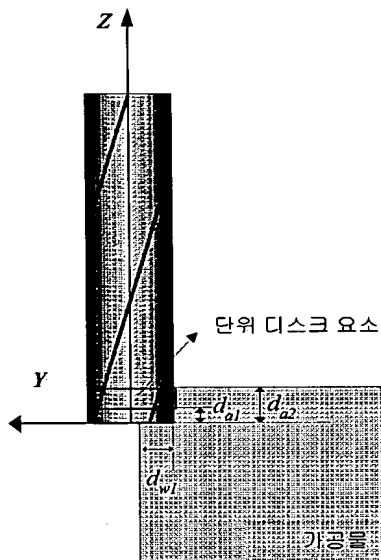
【도 2】



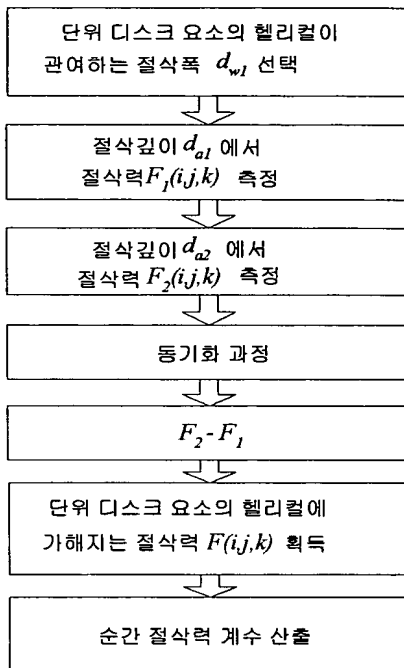
【도 3】



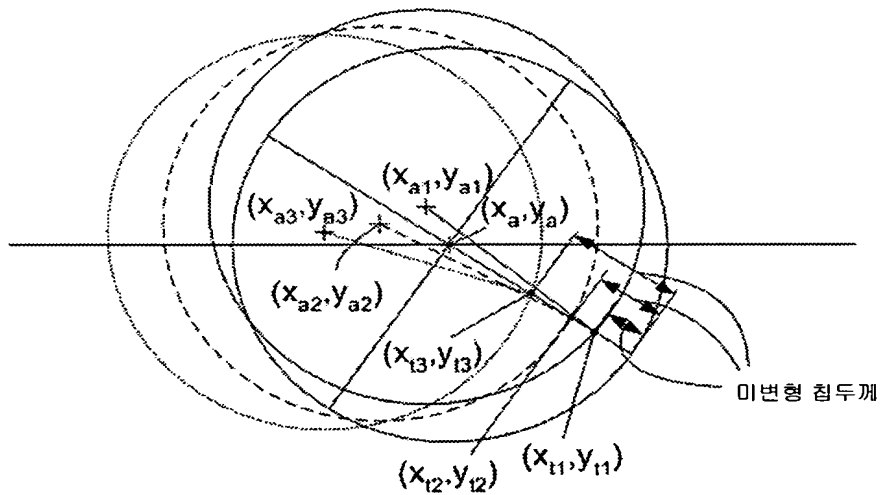
【도 4】



【도 5】

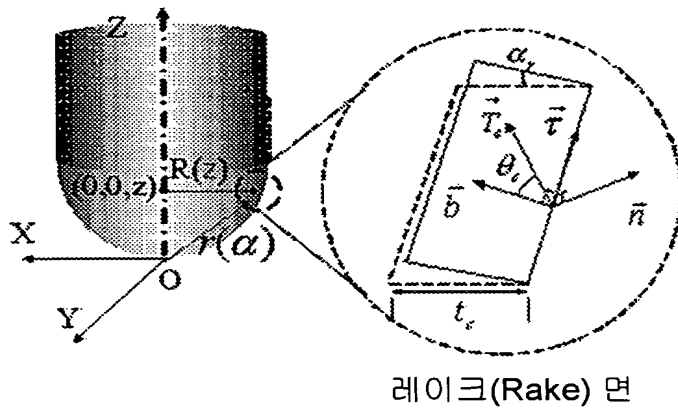


【도 6】

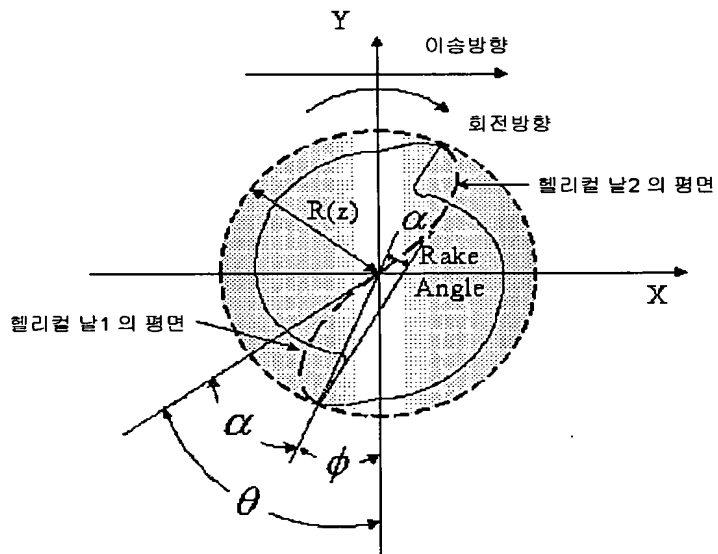




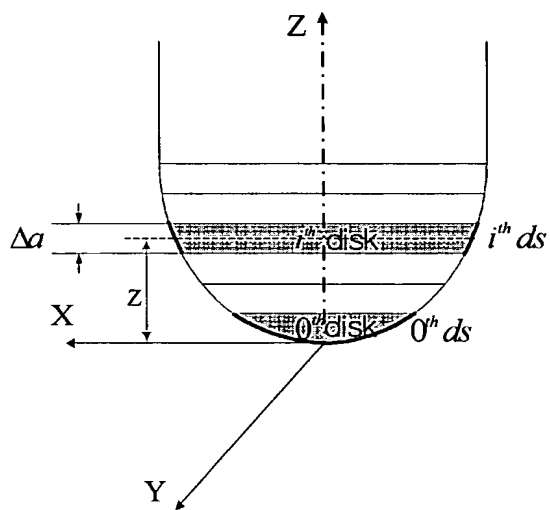
【도 7a】



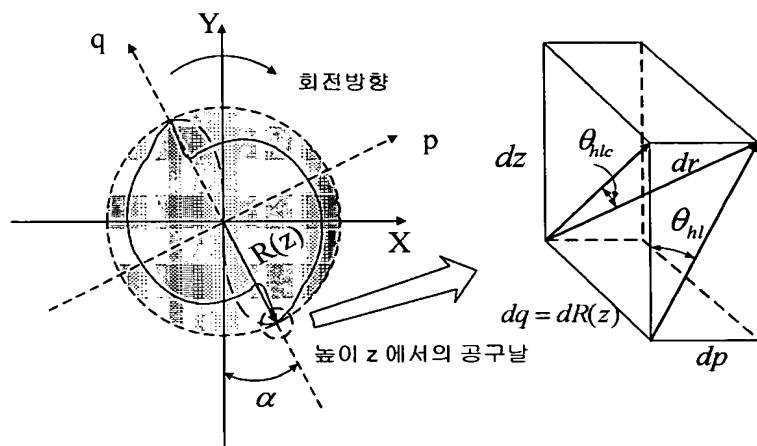
【도 7b】



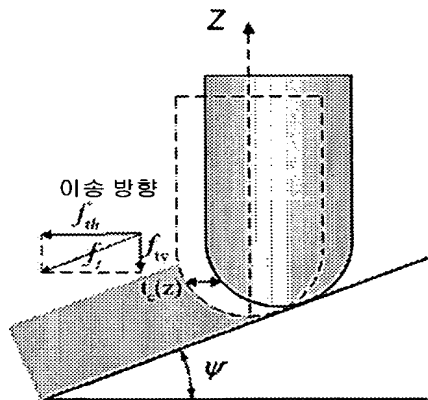
【도 8】



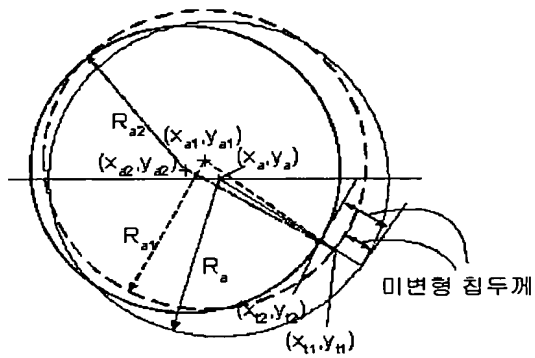
【도 9】



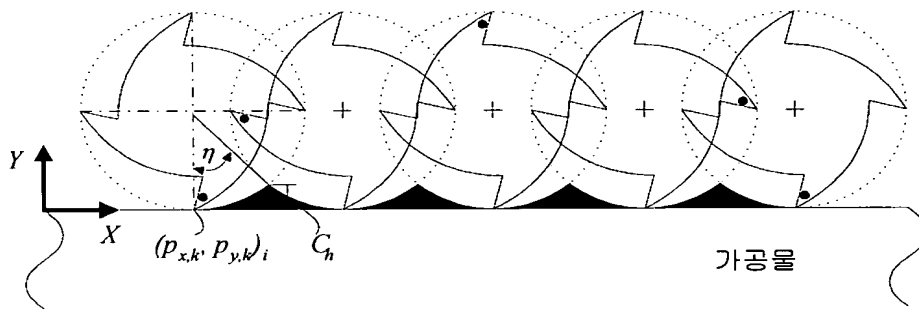
【도 10a】



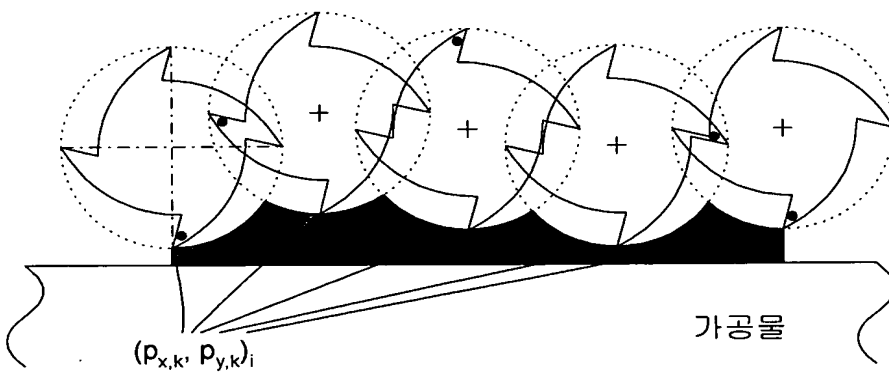
【도 10b】



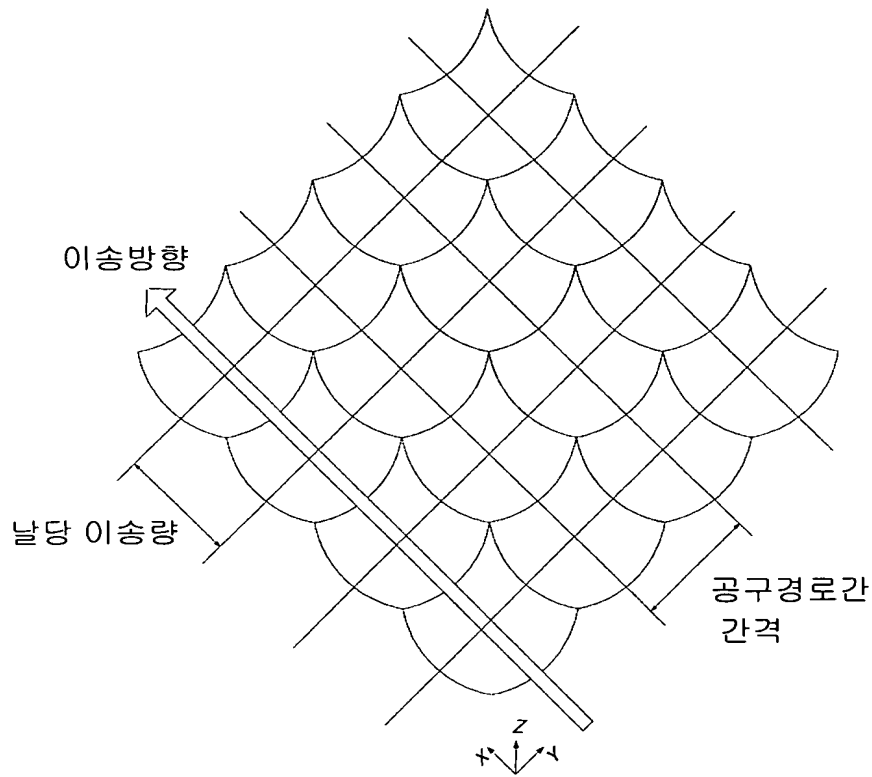
【도 11a】



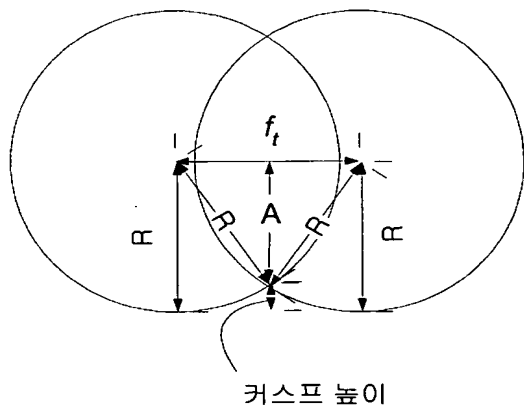
【도 11b】



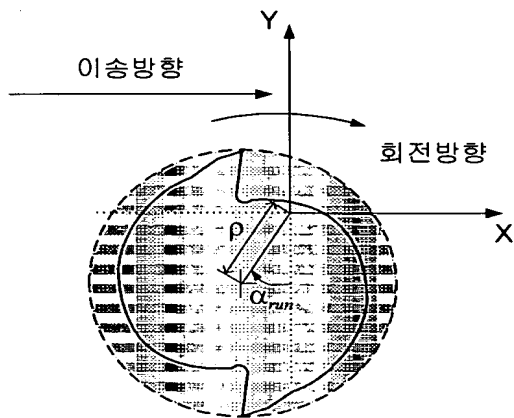
【도 11c】



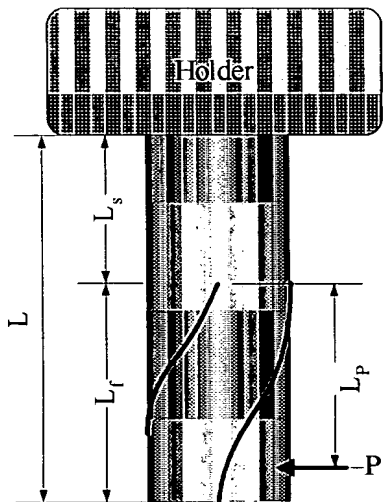
【도 12】



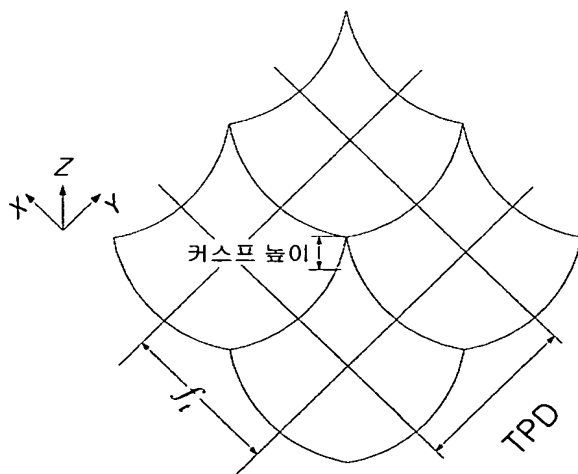
【도 13】



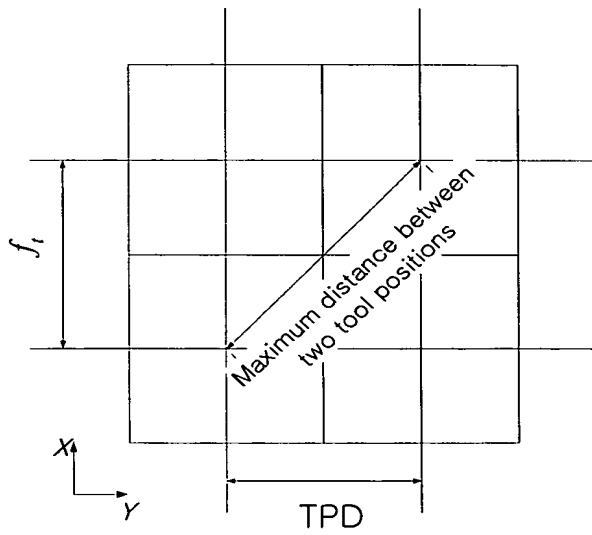
【도 14】



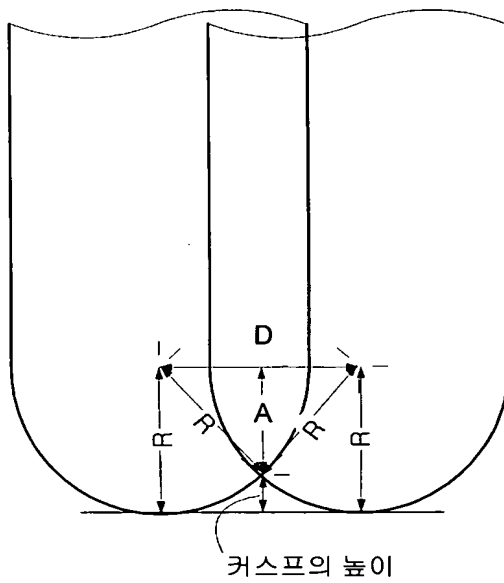
【도 15a】



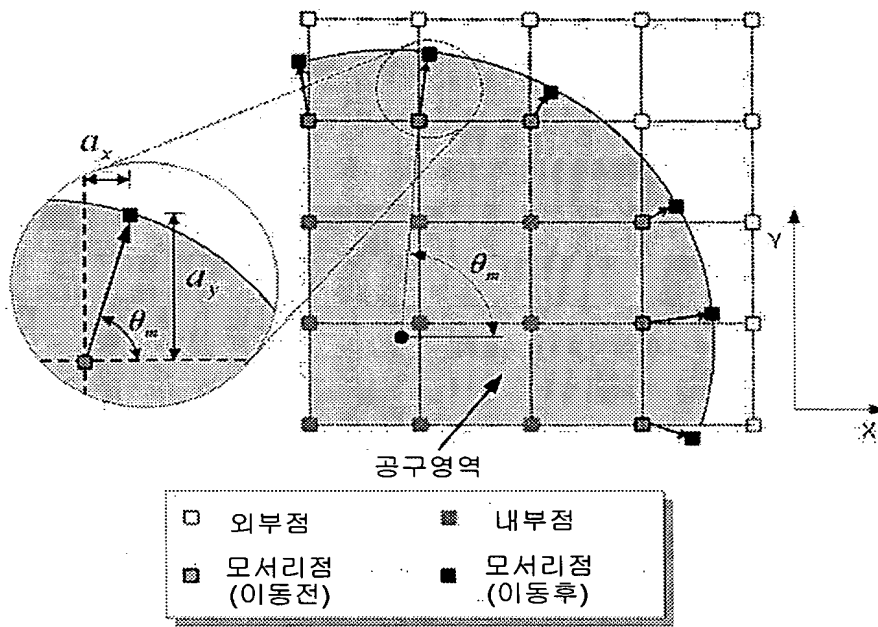
【도 15b】



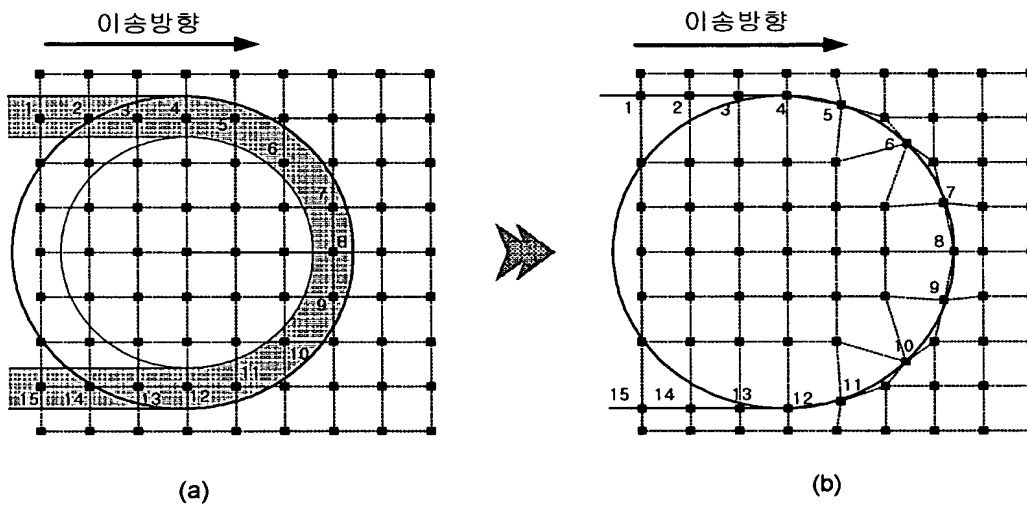
【도 15c】



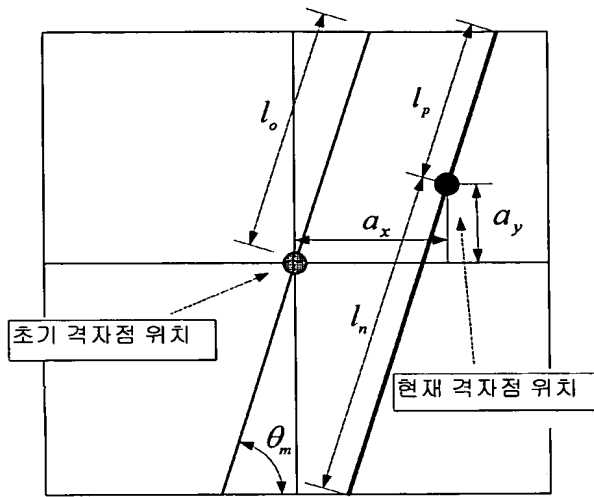
【도 16】



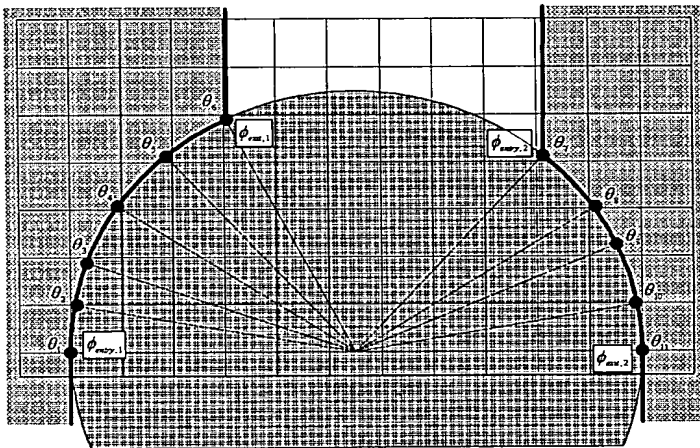
【도 17】



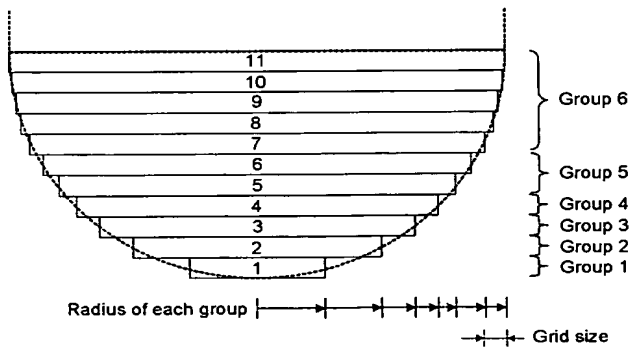
【도 18】



【도 19】

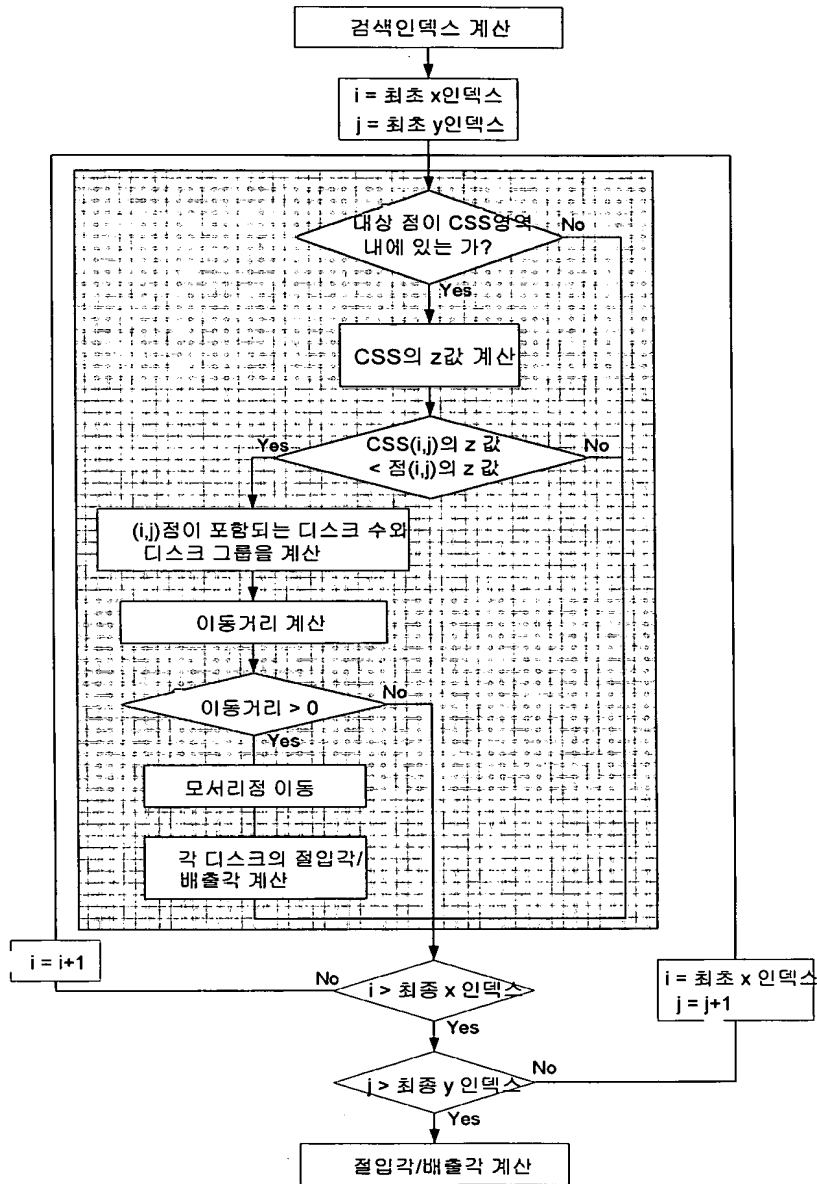


【도 20】

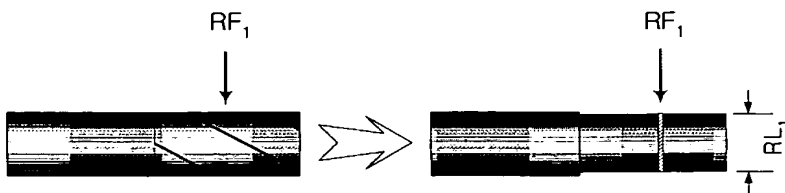




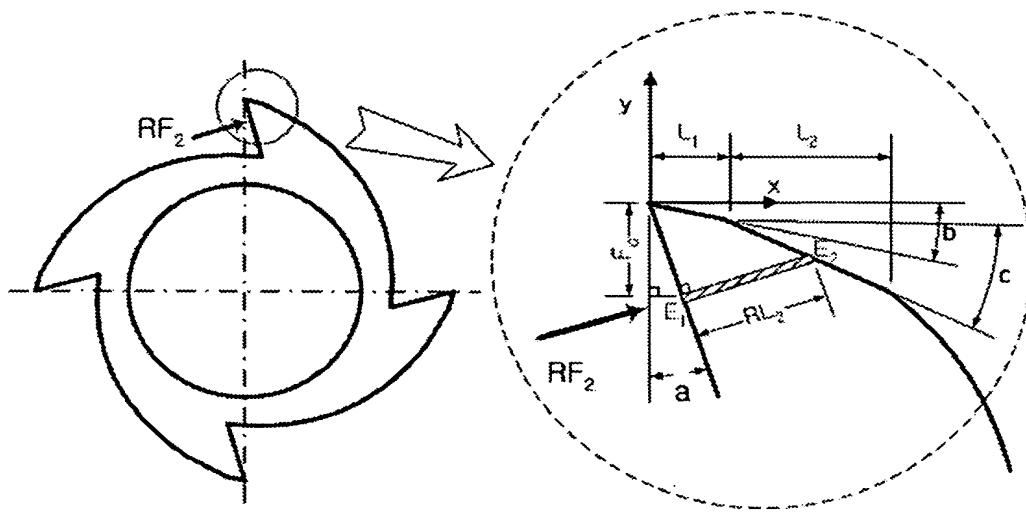
【도 21】



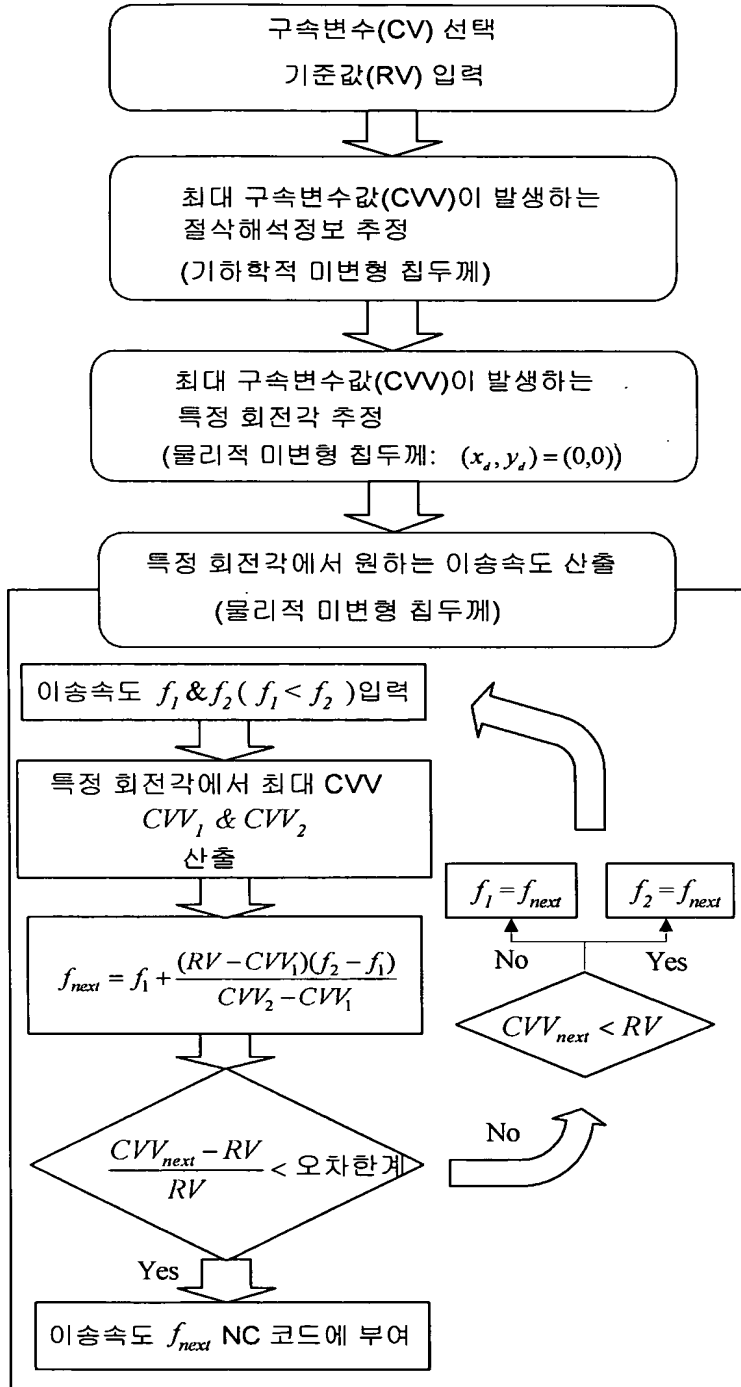
【도 22a】



【도 22b】



【도 23】



【도 24】

